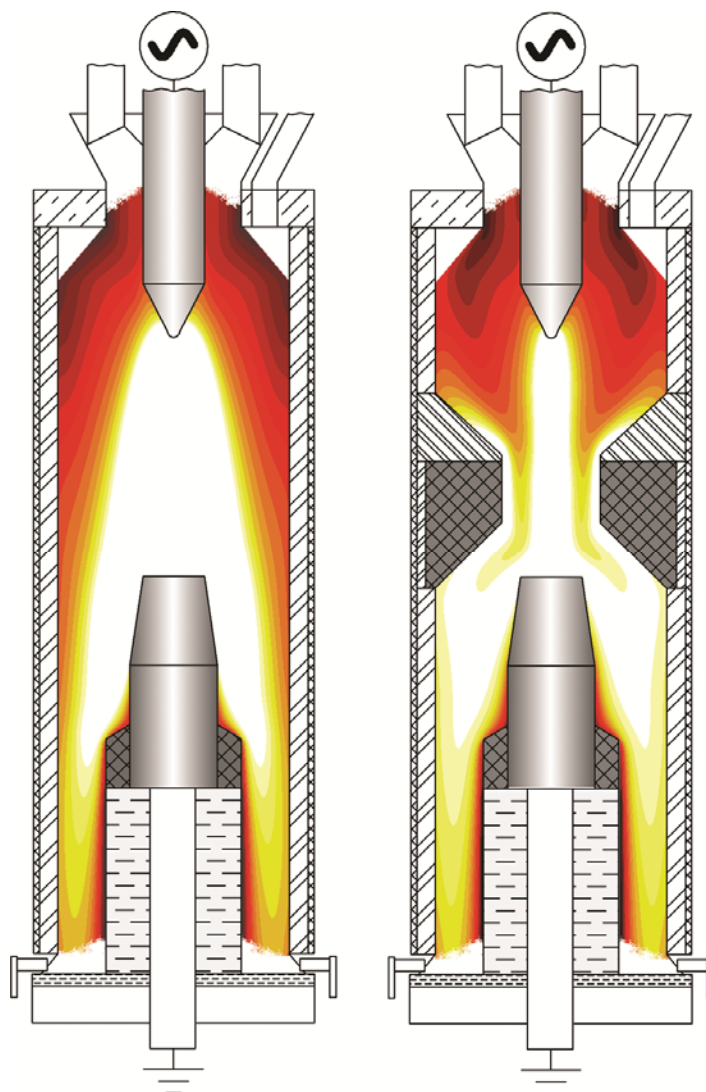


*Т. В. Лазарєв, А. Я. Карвацький, Є. М. Панов,
С. В. Лелека, А. Ю. Педченко*

ЗАКОНОМІРНОСТІ ПРОЦЕСУ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОБРОБЛЕННЯ СИПУЧИХ ВУГЛЕЦЕВИХ МАТЕРІАЛІВ В ЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕЧАХ



Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

*Т. В. Лазарєв, А. Я. Карвацький, Є. М. Панов,
С. В. Лелека, А. Ю. Педченко*

ЗАКОНОМІРНОСТІ ПРОЦЕСУ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОБРОБЛЕННЯ СИПУЧИХ ВУГЛЕЦЕВИХ МАТЕРІАЛІВ В ЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕЧАХ

Монографія

Київ
НТУУ «КПІ»
2016

УДК 621.365.32
ББК 31.292-5
3-19

*Рекомендовано Вченою радою НТУУ «КПІ»
(Протокол № 3 від 14.03.2016 р.)*

Авторський
колектив: *Т. В. Лазарєв, А. Я. Карвацький, Є. М. Панов,
С. В. Лелека, А. Ю. Педченко*

Рецензенти: *Є.В. Штефан, д-р техн. наук, проф.,
Національний університету харчових технологій*
*О.С. Парфенюк, д-р техн. наук, проф.,
Донецький національний технічний університет*

Відповідальний
редактор *І.О. Мікульонок д-р техн. наук, проф.,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»*

3-19 Закономірності процесу високотемпературного оброблення сипучих вуглецевих матеріалів в електричних печах: монографія / Т. В. Лазарєв, А. Я. Карвацький, Є. М. Панов та ін. – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – 154 с. – Бібліогр.: с. 144–151. – 300 прим.
ISBN

Монографію присвячено створенню наукових засад розробки ефективних процесів та обладнання для високотемпературного оброблення сипучих вуглецевих матеріалів в електропечах. Запропоновано фізичну та математичну моделі процесу високотемпературного оброблення рухомого шару сипучого вуглецевого матеріалу в електропечі, що базуються на поєднанні дискретного уявлення про статистику і динаміку сипучих речовин та математичних формулювань механіки суцільного середовища з урахуванням конвективного переносу теплоти щільним рухомих шаром матеріалу та джерела теплоти від хімічних реакцій. Наведено результати експериментальних і числових досліджень статистики і динаміки сипучого середовища, теплофізичних властивостей і процесу термообробки антрациту та нафтового коксу в електрокальцинаторі. Досліджено вплив на систему визначальних технологічних показників експлуатації обладнання таких параметрів, як дизайн й геометричні характеристики дросельовального пристрою, активна електрична потужність та продуктивність.

Для фахівців кольорової і чорної металургії та електродного виробництва, а також викладачів, аспірантів і студентів енергетичних та інженерно-хімічних спеціальностей вищих навчальних закладів.

**УДК 621.365.32
ББК 31.292-5**

ISBN

© Т. В. Лазарєв, А. Я., Карвацький,
Є. М. Панов, С. В. Лелека,
А. Ю. Педченко, 2016
© НТУУ «КПІ» (ІХФ), 2016

ВСТУП

Високотемпературне оброблення сипучих матеріалів є одним із найважливіших підготовчих процесів у різних областях хімічних, металургійних та інших виробництв. Зокрема прожарювання вуглецевої сировини є одним із перших етапів під час виробництва електродної продукції. Підчас прожарювання з матеріалу видаляється волога й летючі, а також здійснюється його усадка та стабілізація фізичних властивостей.

Нагрівання вуглецевої сировини може відбуватися за рахунок теплоти згоряння хімічних речовин, кондуктивного чи конвективного теплообміну та через виділення джоулевої теплоти, при проходженні крізь матеріал електричного струму. Останній спосіб є найбільш привабливим через високу його ефективність та контрольованість, можливість проводити процес за температури понад 2000 °C, незначні втрати матеріалу через вигорання.

Безперервне високотемпературне оброблення сипучих вуглецевих матеріалів джоулевою теплотою може проводитися в шахтних електричних печах – електрокальцинаторах. Відомі у світі конструкції цих печей різняться за своїми конструктивними та технологічними показниками, але загалом мають спільний недолік – значну нерівномірність температурного поля в зоні прожарювання робочого простору печі, що призводить до значних коливань теплоелектричних властивостей кінцевого продукту. Крім того, футеровка таких агрегатів працює за значних термічних навантажень, що спричинює її руйнування та відповідно тривалі простої та затратні капітальні ремонти обладнання.

Подальший розвиток технології високотемпературного оброблення сипучих вуглецевих матеріалів потребує розробки нових і модернізації діючих конструкцій електрокальцинаторів, що зможуть мінімізувати існуючі недоліки та дозволять отримувати кінцевий продукт з більш високими показниками якості. Ця задача вимагає проведення ґрунтовної науково-дослідної роботи, що включає високотемпературні дослідження теплоелектричного стану діючих електрокальцинаторів та визначення закономірностей процесу електричного нагріву в цих печах з урахуванням руху сипучого середовища та теплоти хімічних реакцій за високої температури.

Сучасний стан розвитку обчислювальних технологій дозволяє будувати складні математичні моделі та проводити числові експерименти, зокрема, із визначення фізичних полів електрокальцинаторів під час прожарювання сипучих вуглецевих матеріалів, що дає змогу теоретично визначати раціональні параметри відповідних процесів та обладнання.

Метою роботи є створення наукових засад розробки ефективних процесів та обладнання для високотемпературного оброблення сипучих вуглецевих матеріалів в електропечах, які забезпечують високоякісний

кінцевий продукт, ресурсо-енергозбереження та зменшення техногенного впливу на навколишнє середовище.

Перший розділ монографії присвячено аналізу стану наукової проблеми та напрямів експериментально-теоретичних досліджень процесу високотемпературного оброблення сипучих вуглецевих матеріалів та процесу прожарювання вуглецевої сировини в електричних печах – електрокальцинаторах. Обґрунтовано вибір методів і завдань досліджень.

У другому розділі сформульовано фізичну та математичну моделі процесу високотемпературного оброблення сипучих матеріалів в електропечах і методики числового розв'язання поставленої задачі. Представлено спеціалізоване програмне забезпечення (ПЗ) і числові моделі динаміки сипучого матеріалу та теплоелектричного стану електрокальцинаторів.

Третій розділ присвячено експериментальним і числовим дослідженням статистики та динаміки сипучих матеріалів.

Четвертий розділ присвячено опису задач, методик і результатів натурних експериментальних досліджень показників якості кінцевого продукту, теплофізичних властивостей антрациту, нафтового коксу та теплових та енергетичних параметрів процесу високотемпературного оброблення вуглецевих матеріалів в електрокальцинаторах різної конструкції.

У п'ятому розділі наведено результати числових досліджень процесу термооброблення сипучих вуглецевих матеріалів в електрокальцинаторах. За допомогою числового експерименту досліджено вплив на теплоелектричний стан та технологічні показники процесу термооброблення сипучих вуглецевих матеріалів в електрокальцинаторах таких параметрів як: дизайн дроселювального пристрою – дросель-шайби, безрозмірні геометричні характеристики дросель-шайби, безрозмірна активна електрична потужність і продуктивність. Визначено раціональні граничні значення відповідних параметрів.

У висновках сформульовано головні результати виконаних досліджень.

У додатках наведено результати тестування ПЗ, результати експериментальних досліджень, верифікації розроблених числових моделей, дані математичного моделювання, розрахунки похибки вимірювання фізичних величин і фізичні властивості матеріалів електропечей.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

\mathbf{a} –	вектор прискорення, $\text{м}^2/\text{с}$;
A –	стала рівняння (1.4), с^{-1} ;
$[\mathbf{A}]$ –	матриця системи лінійних алгебричних рівнянь;
\mathbf{b} –	вектор масової сили, $\text{Н}/\text{кг}$; вектор вільних членів СЛАР;
B –	енергія активації процесу графітування, $\text{Дж}/\text{моль}$;
c_p –	масова ізобарна теплоємність, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$;
\bar{c} –	середня міжшарова відстань дослідного матеріалу, нм ;
$C_{\text{пр}}$ –	безрозмірна об'ємна зона прожарювання;
d_s –	середній діаметр частинок, м ;
\bar{D} –	безрозмірний діаметр;
e_{ss} –	коефіцієнт реституції після зіткнення частинок;
E –	модуль пружності при одноосному розтягненні/стисканні, Па ;
f –	кількість граней скінченного об'єму (комірки);
\mathbf{F}_{ij} –	зовнішня сила, що діє на частинку i через контакт з частинкою j , Н ;
\mathbf{F}_q –	зовнішня об'ємна сила, $\text{Н}/\text{м}^3$;
$\mathbf{F}_{vm,q}$ –	віртуальна масова сила у фазі q , що віднесена до об'єму, $\text{Н}/\text{м}^3$;
\mathbf{g} –	вектор прискорення вільного падіння, $\text{м}/\text{с}^2$;
$g_{0,ss}$ –	функція радіального розподілу ймовірності зіткнення між гранулами;
G –	масова витрата, $\text{кг}/\text{с}$;
\bar{G} –	безрозмірна продуктивність;
h –	масова ентальпія, $\text{Дж}/\text{кг}$; висота, м ;
h_{pq} –	масова ентальпія поверхні, $\text{Дж}/\text{кг}$;
I –	сила струму, А ;
\bar{I} –	безрозмірна сила струму;
I_i –	момент інерції частинки i , $\text{кг}\cdot\text{м}^2$;
\mathbf{I} –	одиничний тензор 2-го рангу;
\mathbf{j} –	вектор густини електричного струму, $\text{А}/\text{м}^2$;
k_i –	кількість частинок, що перебувають у контакті з частинкою i ;
k_n –	коефіцієнт пружності за нормальної контактної взаємодії, $\text{Н}/\text{м}$;
k_p –	коефіцієнт потужності;
k_t –	коефіцієнт зсуву за контактної взаємодії, $\text{Н}/\text{м}$;
K –	константа швидкості процесу графітування, с^{-1} ;

K_{pq} –	коефіцієнт обміну кількістю руху між фазами, $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$;
L –	розмір кристалів, нм;
m –	маса, кг;
\dot{m}_{pq} –	характеристика передачі маси з фази p у фазу q , $\text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^3)$;
\mathbf{M}_{ij} –	момент опору коченню, $\text{Н} \cdot \text{м}$;
n –	кількість вимірювань;
\mathbf{n} –	вектор нормалі до поверхні;
N –	кількість комірок або кількість вузлів;
p –	тиск, Па; частка шарів, що перебувають в турбостатному стані;
P –	електрична потужність, Вт; інтервал довірчої ймовірності;
\bar{P} –	безрозмірна активна електрична потужність;
q_{vchem} –	об'ємна густина джерела теплоти від хімічних реакцій взаємодії матеріалу з навколишнім середовищем при високій температурі, $\text{Вт}/\text{м}^3$;
\mathbf{q} –	вектор густини теплового потоку, $\text{Вт}/\text{м}^2$;
\mathbf{Q}_{pq} –	вектор інтенсивності передачі теплоти між фазами p і q , $\text{Вт}/\text{м}^3$;
\mathbf{r} –	радіус-вектор, м;
R –	універсальна газова стала, $\text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$;
\bar{S} –	безрозмірна площа;
S_q –	об'ємна теплота хімічних реакцій, $\text{Вт}/\text{м}^3$;
\mathbf{S} –	вектор, що дорівнює площі грані комірки, м^2 ;
t –	температура, $^{\circ}\text{C}$;
T –	абсолютна температура, К;
\mathbf{T}_{ij} –	зовнішній крутний момент, пов'язаний з контактною взаємодією частинок i та j , $\text{Н} \cdot \text{м}$;
u –	електричний потенціал, В;
\hat{U} –	масова внутрішня енергія, $\text{Дж}/\text{кг}$;
\mathbf{v} –	вектор швидкості, $\text{м}/\text{с}$;
\mathbf{v}_i –	вектор лінійної швидкості центра маси частинки i , $\text{м}/\text{с}$;
\mathbf{v}_{pq} –	вектор швидкості міжфазної поверхні, $\text{м}/\text{с}$;
V –	об'єм, м^3 ;
\mathbf{V} –	вектор швидкості, $\text{м}/\text{с}$;
x_i –	окреме значення вимірюваної величини;
\bar{x} –	середнє арифметичне значення вимірюваної величини;
\mathbf{x} –	вектор невідомих величин;
(x, y, z) –	декартова система координат, м;
α –	коефіцієнт тепловіддачі, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

α_q –	об’ємна частка фази q ;
β –	безрозмірний коефіцієнт демпфування;
$\delta(\bar{x})$ –	дослідно-експериментальна похибка середнього вимірювання;
$\delta(\psi_k)$ –	систематична й методична похибки вимірювань;
Δx_k –	абсолютна систематична похибка k -го фактору;
$\Delta \tau$ –	крок інтегрування за часом, с;
ϕ –	будь-яке тензорне поле;
γ –	ступінь графітування; коефіцієнт демпфування, кг/с;
γ_t –	коефіцієнт демпфування в тангенціальному напрямі до контакту, кг/с;
γ_{Θ_s} –	дисипація енергії зіткнення твердих частинок, Вт/м ³ ;
Γ –	границя; фізична властивість середовища;
λ –	ефективна теплопровідність сипучого матеріалу, Вт/(м·К);
λ_q –	об’ємна в’язкість фази q , Па·с;
μ_q –	зсувна в’язкість фази q , Па·с;
μ_r –	коефіцієнт тертя кочення;
μ_s –	коефіцієнт тертя ковзання;
ν –	коефіцієнт Пуассона;
π –	число Пі;
$\theta(x_i)$ –	випадкова похибка окремого вимірювання;
Θ_s –	гранульна температура (кінетична енергія частинок), Дж/кг;
ρ –	густина, кг/м ³ ;
σ –	тензор напружень, Па;
σ –	ефективна питома електропровідність сипучого матеріалу, (Ом·м) ⁻¹ ;
$\sigma(\bar{x})$ –	повна похибка прямого вимірювання величини x ;
τ –	час, с;
$\bar{\tau}$ –	безрозмірний час;
$\bar{\bar{\tau}}$ –	тензор напружень, Па;
ω_i –	вектор кутової швидкості частинки i , рад/с;
ω –	частота обертання, с ⁻¹ , Гц;
Ω –	розрахункова область;
ξ –	коефіцієнт Ст’юдента;
ξ_n –	відносне нормальне перекриття частинок при контактній взаємодії, м;
ξ_t –	відносне тангенціальне перекриття частинок, м;
Ψ –	будь-який диференціальний оператор;
ψ_k –	поправка на вплив систематичної похибки k -го фактору.

Основні індекси:

* –	стосується ефективного або приведенного значення;
0 –	стосується початкового значення;
bc –	стосується граничних умов;
chem –	стосується хімічних реакцій;
eff –	стосується ефективного значення;
E –	стосується електричного поля;
f –	стосується грані комірки;
відн –	стосується відносної похибки;
вузл –	стосується вузлів;
гірки –	стосується гірки сипучого середовища;
д –	стосується діючого значення;
дат –	стосується похибки датчика;
др –	стосується дросель-шайби;
Е.Р.С. –	стосується електрорушійної сили;
зад –	стосується заданого значення;
іст –	стосується істинної величини;
ком –	стосується комірок;
окр –	стосується похибки округлення;
пр –	стосується процесу прожарювання; відноситься до похибки приладу;
ТВР –	стосується вольфрам-ренієвих термопар;
ТХА –	стосується хромель-алюмелевих термопар.

Інші символи:

“+”, “–” –	праворуч і ліворуч від границі Γ , відповідно;
div –	дивергенція;
• –	будь-який тензорний оператор;
· –	скалярний добуток векторів;
: –	оператор скалярного добутку двох тензорів;
∇ –	оператор Гамільтона (“набла”);
\emptyset –	діаметр.

Основні скорочення:

CAD –	computer-aided design – системи автоматизованого проектування;
CAE –	computer-aided engineering – системи автоматизованого конструювання;
DNS –	Direct Numerical Simulation – метод прямого числового розв’язання системи рівнянь Нав’є-Стокса;
LES –	Large Eddy Simulation – метод моделювання великих вихорів;

LIGGGHTS –	Improved for General Granular and Granular Heat Transfer Simulations;
OpenFOAM –	вільно розповсюджуваний, відкритий програмний код, який є широким набором інструментів для розв’язання задач обчислювальної механіки суцільних середовищ;
RANS –	Reynolds averaged Navier-Stokes equations – осереднені за Рейнольдсом рівняння Нав’є-Стокса;
БК –	вимірювальний комплекс;
ГУ –	граничні умови;
ЕВ –	електродні вироби;
ІХФ –	інженерно-хімічний факультет
КПЗ –	комерційне програмне забезпечення;
КПУ –	кут природного укусу;
МДЕ –	Метод Дискретного Елемента;
кафедра	кафедра хімічного, полімерного та силікатного
ХПСМ –	машинобудування НТУУ «КПІ»;
МСО –	метод скінченних об’ємів;
НДЦ «РТ» –	науково-дослідний центр «Ресурсозберігаючі технології» НТУУ «КПІ»;
НТУУ «КПІ» –	Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»;
ПАТ –	публічне акціонерне товариство;
ПВЕ –	питомі витрати електроенергії;
ПЕО –	питомий електричний опір;
ПЗ –	програмне забезпечення;
ПК –	персональний комп’ютер;
СЛАР –	система лінійних алгебричних рівнянь;
ТВР –	термопара вольфрам-ренієва;
ТХА –	термопара хромель-алюмелева.

1. СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОБРОБЛЕННЯ СИПУЧИХ ВУГЛЕЦЕВИХ МАТЕРІАЛІВ

Вуглеграфітові електродні вироби (ЕВ) широко використовуються у виробництві кольорових і чорних металів, феросплавів, карбіду кальцію, фосфору, хлору, штучних абразивів тощо. Це обумовлено унікальними фізико-хімічними властивостями штучного графіту. Цей матеріал здатен витримувати значні термічні та механічні навантаження, має високу електропровідність, хімічно інертний та має низький коефіцієнт тертя. Найважливішими виробами зі штучного графіту є електроди електротермічної та електрохімічної промисловості, блоки футеровки агрегатів чорної та кольорової металургії, ядерних реакторів. Якість виготовлюваних ЕВ визначається однорідністю властивостей та структури, що закладаються ще на етапі підготовки сировини. Тому переділ підготовки вхідного матеріалу є надзвичайно важливим.

1.1. Фізичні властивості штучного графіту та технологія його виробництва

1.1.1. Фізичні властивості, структура графіту та механізми процесу графітування вуглецю

Графіт представляє собою кристалічну форму вуглецю. Відповідно до періодичної системи Менделєєва вуглець має порядковий номер шість і розташований у четвертій групі елементів. Природний вуглець складається з двох стабільних нуклідів – ^{12}C (98,892 %) і ^{13}C (1,108 %) та одного радіоактивного нукліду ^{14}C (β -випромінювач, період піврозпаду 5730 років) [1, 2]. Атомна маса вуглецю становить $12,0111 \pm 0,00005$ г/моль.

Натепер відомі такі алотропні модифікації вуглецю як графіт, алмаз, карбін, лонсдейліт, фулерени, вуглецеві нанотрубки, графен та аморфний вуглець. За відповідних умов вуглець може переходити із однієї модифікації в іншу, наприклад, із графіту в алмаз [3, 4].

Як це було зазначено, графіт представляє собою кристалічну модифікацію вуглецю та переважно має гексагональну структуру, у якій атоми розташовані паралельними шарами і в кожній площині утворюють сітку з правильних шестикутників з відстанню між атомами $1,415 \text{ \AA}$.

Відстань між шарами в структурі графіту дорівнює $3,354 \text{ \AA}$. Шари у структурі графіту зміщені один відносно другого на величину відстані між атомами у шарі. Енергія зв'язків між атомами вуглецю у шарі становить

порядку (250–350) кДж/моль, а енергія зв'язку атомних шарів більш ніж у 10 разів менша і становить (26–38) кДж/моль [5, 6].

Завдяки своїй структурі графіт характеризується такими особливостями:

- високою анізотропією фізичних властивостей; коефіцієнт анізотропії для монокристалів може бути вищим за 5;
- достатньо високою інертністю до хімічної взаємодії;
- хорошими антифрикційними властивостями. Коефіцієнт тертя по металу (для робочої швидкості до 10 м/с) становить (0,03–0,05);
- високою електро- і теплопровідністю в напрямку паралельному базисній площині;
- діамагнітністю з високою магнітною сприйнятливістю в напрямку перпендикулярному базисним площинам та незначною в паралельному;
- збільшенням міцності під час підвищення температури. Так, границя міцності на розтяг з підвищенням температури зростає в (1,5–2,5) рази, досягаючи свого максимуму за температури (2400–2800) °С; границя міцності на стискання збільшується в (1,3–1,6) рази в інтервалі (2200–2300) °С; модулі пружності і зсуву зростають в (1,3–1,6) рази в інтервалі (1600–2200) °С. З підвищенням температури до 3000 °С і вище властивості міцності доволі різко знижуються і за температури 3200 °С наближаються до властивостей при 20 °С;
- крихкістю в інтервалі температур (20–2000) °С;
- невисокою густиною – (1700–2200) кг/м³.

У промисловості використовується як природний, так і штучний графіт. Природний графіт зустрічається у вигляді окремих лусочок, пластинок або скупчень. Розрізняють родовища кристалічного графіту, які пов'язані з магматичними гірськими породами або кристалічними сланцями, і прихованокристалічного графіту, що утворився при метаморфізмі вугілля. У кристалічних сланцях вміст графіту становить (3–20) %, в магматичних гірських породах (3–50) %, а у вугіллі (60–85) %. Кристалічний графіт отримують з руди методом флотації, а прихованокристалічний графіт використовують без збагачення.

Штучний графіт отримують із вуглевмісної речовини. Процес отримання штучного графіту називається процесом графітування і полягає у тривимірному упорядкуванні атомів вуглецю в структуру графіту під дією високих температур [7].

Залежно від способу одержання розрізняють такі типи штучного графіту:

- ачесонівський графіт, який отримують за допомогою нагрівання суміші коксу або кам'яного вугілля з пеком;

- рекристалізований графіт – термомеханічною обробкою суміші, яка містить кокс, пек, природний графіт та карбідоутворюючі елементи;
- пірографіт – отримують піролізом газоподібних вуглеводнів;
- доменний графіт – утворюється при повільному охолодженні великої маси чавуну;
- карбідний графіт – отримують при термічному розкладі карбідів.

Вихідна неграфітована вуглевмісна речовина представляє собою утворення із відносно великих гексагональних шарів з великою кількістю згинів, вакансій та їх груп і значної кількості гетероатомів. Присутні окремі плоскі ділянки з розташуванням шарів близьких до паралельних. Такі групи площин можуть розташовуватись або у вигляді лінійно-протяжних утворень (струменеві або голчасті складові), або у виді сферичних (сферолітова структура). Поряд з відносно впорядкованими утвореннями присутня також деяка кількість аморфного вуглецю. У неграфітованому матеріалі міжшарова відстань дорівнює 0,3425 нм, а визначений за шириною дифракційних ліній діаметр шарів складає біля 2 нм.

Структурна анізотропія вихідного матеріалу, тобто взаємне розташування вуглецевих сіток, обумовлює його спроможність до графітування. Паралельне розташування шарів у пакетах і мала їх розорієнтація відносно один одного сприяє їх випрямленню та агрегації у групи. У цьому випадку вуглецевий матеріал легко графітується.

У процесі нагрівання неупорядкована структура неграфітованого вуглецю проходить низку змін. Процес зміни структури достатньо складний та остаточно не вивчений. На даний час існує декілька гіпотез про механізм процесу графітування. За одної з них, яка була висунута в праці [8], зміна структури вуглевмісної речовини при гомогенному графітуванні відбувається дискретно і може бути описана за такою схемою:

- на першому етапі відбувається зростання шарів кристалічної решітки. В інтервалі температур від 1000 °С до 2000 °С діаметр шарів нафтового коксу збільшується до 20 нм;
- на другому етапі зростання шарів уповільнюється; відбувається переорієнтація шарів кристалічної решітки та їх паралельне укладання; зменшується міжшарова відстань;
- на третьому етапі відбувається тривимірне упорядкування, яке пов'язане зі взаємним обертанням шарів та наближенням до структури графітового монокристалу.

Ця гіпотеза достатньо добре описує механізм процесу графітування, якщо її доповнити результатами праці [9], відповідно до яких графітування представляє собою термічно активований процес, який складається у першу чергу в дискретному видаленні дефектів, які створюють і стабілізують

неупорядковану структуру вуглецевих матеріалів, що графітуються. До таких дефектів: аліфатичні вуглець-вуглецеві поперечні зв'язки, відсутність атомів вуглецю в шарах (вакансії), викривлення шарів, міжшарові атоми вуглецю і радикали, ромбоєдрична модифікація графітової решітки, внутрішньокристалічні пори, дислокаційні сітки. До найбільш суттєвих дефектів, які порушують графітову решітку, слід віднести міжшарові атоми вуглецю та СН-радикали, які спричиняють розсування шарів та їх викривлення, а також вакансії та пори. Відповідно до вищезазначеного можна припустити, що зі зростанням кількості видалених міжшарових атомів вуглецю і радикалів відбувається збільшення кількості гексагональних площин, які перебувають у стані в'язкої течії та наближаються в результаті взаємного переміщення до стану тривимірного упорядкування. Процес взаємного переміщення гексагональних шарів супроводжується зменшенням міжшарової відстані від 3,425 Å (неупорядкована, турбостатна структура) до 3,354 Å (структура ідеального графіту) [5, 10].

Необхідно зазначити, що за звичайних умов проходження процесу графітування неможливо отримати графіт з ідеальною структурою, тому що частина речовини лишається в турбостатному, неупорядкованому стані.

Для оцінки ступеня графітування (ступеню тривимірного упорядкування) матеріалу найчастіше всього використовують залежність виду

$$\gamma = \frac{0,3425 - \bar{c}/2}{0,3425 - 0,3354}, \quad (1.1)$$

де 0,3425 – міжшарова відстань речовини з повністю неупорядкованою, турбостатною структурою, нм; 0,3354 – міжшарова відстань ідеального графітового монокристалу, нм; $\bar{c}/2$ – середня міжшарова відстань дослідного матеріалу, нм.

Середня міжшарова відстань визначається за допомогою рентгенографічного аналізу і, наприклад, для типового реакторного графіту $\bar{c}/2$ складає 0,336 нм. Оскільки сусідні шари вуглецевих сіток можуть перебувати тільки у крайніх положеннях, тобто в орієнтованих шарах на відстані 0,354 нм або за відсутності взаємної орієнтації на відстані 0,344 нм, то зв'язок між середньою міжшаровою відстанню та часткою речовини, що залишилася у турбостатному стані можна виразити такою залежністю [11]

$$\bar{c}/2 = 0,344 - 0,0086(1 - p) - 0,0064p(1 - p), \quad (1.2)$$

де p – частка шарів, що перебувають у турбостатному стані; коефіцієнт 0,0086 – різниця міжшарових відстаней 0,344 нм і 0,3354 нм.

На ступінь графітування впливає багато чинників, зокрема температура процесу, час витримки, склад газової фази, особливості вихідної сировини та її підготовка та ін. Але найбільше на ступінь графітування вуглевмісної речовини впливає температура процесу графітування. Для визначення ступеню графітування залежно від температури процесу і тривалості витримки використовується залежність

$$\gamma = 1 - \exp(-K\tau), \quad (1.3)$$

де K – константа швидкості процесу графітування, с^{-1} ; τ – час, с .

Константа швидкості процесу графітування залежить від температури та визначається на основі рівняння, аналогічного рівнянню Ареніуса

$$K = A \exp\left(-\frac{B}{RT}\right), \quad (1.4)$$

де T – абсолютна температура процесу, К ; $R = 8,31441 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ – універсальна газова стала; A – стала рівняння, с^{-1} ; B – енергія активації процесу графітування, $\text{Дж}/\text{моль}$.

Коефіцієнти A і B залежать від виду вихідного матеріалу [10].

1.1.2. Технологія отримання штучного графіту

Графіт є найбільш стійкою і поширеною формою вуглецю за звичайних умов. Підвищені механічні властивості графіту при нагріванні до високих температур і обумовлюють його вибір як матеріалу для умов, де необхідні висока термостійкість і електропровідність. Це, наприклад, електротермія, чорна та кольорова металургія, хімічна промисловість, атомна енергетика та ін.

Штучний графіт отримують з вуглевмісних матеріалів – твердого наповнювача і зв'язувального [12–18].

Основними вимогами, які ставлять до наповнювачів, є необхідність гарного змочування зв'язувальним, висока електропровідність, механічна та термічна міцність [13, 17]. Властивості наповнювача суттєво впливають на експлуатаційну стійкість одержуваних вуглеграфітових електродів [19, 20]. Сировиною для наповнювача слугують різні види коксу (нафтові, пекові, кам'яновугільні та ін.), антрацити, термоантрацити [6, 15, 19, 21].

Основною функцією зв'язувального є надання зв'язаності та пластичності електродній масі під час її формування. У якості зв'язувального застосовуються кам'яновугільні пеки (м'який, середньотемпературний та

високотемпературний), які відрізняються температурами розм'якшення [12, 19, 22, 32, 33].

Згідно з технологічною схемою отримання вуглеграфітових виробів (рис. 1.1) [12, 17] спочатку сирі вуглецеві матеріали (наповнювач) попередньо подрібнюють, а потім здійснюють їх термічну обробку до високих температур без доступу повітря в різноманітних печах прожарювання.

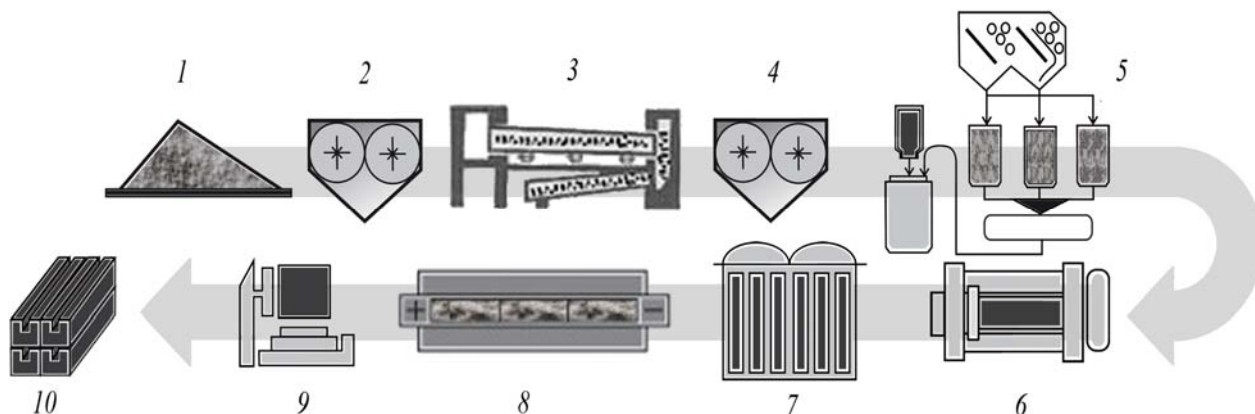


Рис. 1.1. Технологічна схема виробництва ЕВ:

1 – сировина; 2 – подрібнення; 3 – прожарювання; 4 – подрібнення;
5 – приготування вуглецевої маси; 6 – пресування; 7 – випалювання;
8 – графітування; 9 – механічна обробка; 10 – складування готових виробів

Після охолодження прожарений матеріал подрібнюється, здійснюється його помел та наступне змішування зі зв'язувальним. Отримана вуглецева маса після попереднього охолодження пресується у так звані «зелені» заготовки, які потім випалюються у спеціальних печах типу Рідгамера [6, 12, 17] упродовж 20–40 діб. При виробництві вуглеграфітових ЕВ стадія випалу є заключною.

Заклучною стадією технологічного процесу виробництва графітованих виробів є процес графітування, сутність якого полягає у високотемпературній обробці цих матеріалів за температури 2500–3000 °С у печах Ачесона або Кастнера [12, 14, 27].

1.1.3. Сучасний стан проблеми термообробки наповнювача електродних виробів

Основною метою процесу термообробки при виготовленні наповнювача ЕВ, якому піддаються антрацит та кокс різного походження, є забезпечення умов для структурної перебудови матеріалу, що прожарюється. Це забезпечує максимальне ущільнення речовини, збільшення його механічної міцності, електро- і теплопровідності та термостійкості [17, 22–25].

У процесі прожарювання відбувається стабілізація усадки матеріалу, що дозволяє контролювати й керувати об'ємними змінами ЕВ під час їх подальшій термічній обробці (випалюванні).

Абсолютне значення усадки при прожарюванні різне для різних вуглецевих матеріалів і залежить від їхньої природи, складу, мікроструктури, вмісту летючих речовин. Для антрациту, що містить 4,1 % летючих, об'ємна усадка становить 14,4 %, а за вмісту летючих 7,3 % усадка зростає до 19 %.

Виділення летючих для всіх видів вуглецевих матеріалів починається з (175–275) °С й зростає з підвищенням температури [13, 22]. Термостійкість органічної сполуки залежить від її структури та обумовлена енергією хімічних зв'язків. Підвищення енергії макромолекул при нагріванні призводить до розриву зв'язків різної міцності й відриву периферійних радикалів, що супроводжується виділенням водню, оксиду вуглецю, метану та інших вуглеводнів C_nH_m , при цьому залишок збагачується вуглецем. Швидкість газовиділення з підвищенням температури зростає неоднаково для різних вуглецевих матеріалів. В антрациті, наприклад, кількість летючих, що виділяються, зростає більш плавно ніж у нафтового коксу.

У зв'язку з характером газовиділення, що залежить від температурних умов, відбуваються об'ємні зміни, пов'язані, передусім з різними хімічними процесами. У межах температур максимального газовиділення периферійні ланцюги відриваються та одночасно відбувається конденсація й полімеризація основних, більш важких вуглеводнів, зі збагаченням їх вуглецем. Ці процеси супроводжуються зближенням окремих структурних елементів матеріалу, що спричинює усадку. З підвищенням температури неперервно зменшується швидкість газовиділення, але глибина піролізу при цьому зростає, а тому з великою інтенсивністю відбуваються структурні ущільнення.

Ущільнення структури вуглецевої речовини при прожарюванні – це складний фізико-хімічний процес. Якщо до термічної обробки антрацити мають більший питомий електричний опір (ПЕО), то з підвищенням температури термообробки до 600 °С відбувається поступове зниження його значення, а в інтервалі (600–900) °С спостерігається різке падіння ПЕО на два-три порядки і при 1300 °С становить близько 1000 мкОм·м. Це пов'язано з перетворенням зв'язків у матриці речовини та зі збільшенням ступеня впорядкованості вуглецевих кристалічних решіток у процесі прожарювання [13, 20, 26].

У працях [24, 26] відзначена кореляція ПЕО з виходом летючих з вуглецевої сировини, причому для антрациту ця залежність найбільш виражена (при зміні вмісту летючих в інтервалі 0–8 %). Як свідчать дослідження авторів [25], виділення летючих найбільш інтенсивно

відбувається в інтервалі (600–800) °С, що спричинює підвищення густини і зміну структури антрациту.

Механічна міцність вуглецевих матеріалів має велике значення, наприклад, крупні зерна термоантрациту створюють основу тіла вуглеграфітового електрода, надаючи йому високу міцність. Границя міцності антрациту на стискання збільшується від 34 до 70 МПа за температури 1300 °С, а нафтового і піролізного коксу – до 28,5 МПа.

У промисловій практиці встановлені оптимальні температури проведення процесу прожарювання. Природно, що температура має сприяти найбільш повному видаленню летючих речовин, що свідчить про бурхливе протікання процесу структурної перебудови. Бажано, щоб вона забезпечувала завершення всього процесу структурної перебудови, що проходить й за більш високих температур, але вже без помітного видалення летючих речовин. В ідеальному випадку термообробку вуглецевих матеріалів необхідно здійснювати за температури, що є максимально можливою в процесі експлуатації виробів, виготовлених на цій сировині.

При прожарюванні матеріалів до (1200–1400) °С завершуються в основному процеси, що спричиняють утворення плоских вуглецевих сіток, а за більш високих температур, понад 2000 °С, (графітуванні) відбуваються процеси, які призводять до тривимірного впорядкування атомів вуглецю.

Зростання виробничих потужностей та вдосконалення технологій у металургійній галузі промисловості підвищують вимоги до електродної продукції. Зокрема, зростає попит на так звану вуглеграфітову продукцію. Для цього типу продукції характерною ознакою є те, що у складі наповнювача є штучний графіт або графітований кокс, масова частка якого, може становити (30–100) %.

Прожарювання вуглецевої сировини може відбуватися в обертових барабанних, ретортних та електричних печах. Також відомим способом є багатостадійний процес отримання нуделя, термічна обробка антрациту у печах графітування. Вибір способу обробки матеріалу залежить від можливостей виробництва та економічних чинників.

Найпоширенішими технологіями обробки вуглецевої сировини до температури (1200–1400) °С є кальцинування в обертових барабанних, ретортних та електричних печах.

Обертова барабанна піч – це футерований вогнетривами барабан довжиною (40–60) м, що встановлено під кутом (2,5–5)° [6]. Барабан обертається зі швидкістю (1–5) об/хв, за рахунок чого матеріал рухається у внутрішньому просторі печі. Нагрівання сировини відбувається завдяки згоряння природного газу та горючих компонентів летючих газів, що

виділяються при прожарюванні коксу чи антрациту. Серйозним недоліком цих печей є значний вигар вуглецю, що може перевищувати 10 %.

Ретортні печі дають можливість отримувати однорідний за фізичними властивостями вуглецевий матеріал [13]. У них матеріал нагрівається теплотою димових газів, яка передається крізь вогнетривку стінку. Ретортна піч являє собою розділений на секції металевий футерований короб. Кожна секція включає декілька реторт та канали, по яких проходять димові гази. Конструкція каналів дає змогу летючим газам, що виділяються із сировини, змішуватися та згоряти разом з природним газом. Рух матеріалу забезпечується механізмами розвантаження та завантаження, які повинні працювати одночасно, тим самим забезпечуючи неперервність процесу. Ретортні печі дають можливість прожарювати матеріали за температури (1150–1200) °С.

Електрокальцинування вуглецевого матеріалу полягає в його нагріванні до певної температури за рахунок джоулевої теплоти, що виділяється при проходженні електричного струму через матеріал, що рухається в робочому просторі електропечі (рис. 1.2). Електрокальцинатор являє собою шахтну електропіч опору постійного чи змінного струму, що складається з металевої циліндричної обичайки, футерованої вогнетривками і теплоізоляційними матеріалами, з осьовим розташуванням двох електродів, що підводять струм (рис. 1.2,а). Внутрішня циліндрична порожнина електропечі утворена вогнетривкою футеровкою і може бути як постійного, так і змінного по висоті поперечного перетину (електрокальцинатор з дроселювальним пристроєм – дросель-шайбою (рис. 1.2,б)) [28, 29]. Зверху циліндричної порожнини розташований живильний вузол, який подає сировину, а знизу – розвантажувальний механізм, який призначений для вивантаження готового продукту. Рівень температури та час перебування оброблюваного матеріалу в зоні прожарювання регулюється продуктивністю механізму розвантаження та рівнем електричної потужності. Високотемпературне оброблення вуглецевих матеріалів у електрокальцинаторах зазвичай проходить за температури (1200–1300) °С.

Робота рядових електрокальцинаторів (див. рис. 1.2,а) характеризується значною нерівномірністю температурного поля в робочому просторі печі, що призводить до значних коливань теплофізичних властивостей вуглецевого наповнювача. Тому в таких агрегатах прожарювання відбувається у дві стадії, що спричинює низьку продуктивність та значні питомі витрати електроенергії. Електричні печі з додатковою утилізацією летючих газів (рис. 1.2,в), що виділяються із оброблюваного матеріалу, знижують нерівномірність температурного поля, але вимагають додаткового очисного та пальникового обладнання. Враховуючи, що температура між центром та периферією печі може коливатися в діапазоні від 700 °С до 2300 °С,

електропіч, що має можливість відбирати лише центральну, найбільш прогріту частину матеріалу (рис. 1.2,з), використовується для отримання звичайного прожареного вуглецевого наповнювача, а також високоякісного графітованого матеріалу.

Високотемпературне оброблення сипучих вуглецевих матеріалів в електрокальцинаторі має значні переваги перед іншими аналогічними процесами:

- менші габаритні розміри;
- більш висока температура прожарювання, відповідно більш якісний кінцевий продукт;
- менший відсоток втрати матеріалу через вигорання;
- більший тепловий ККД;
- використання електричної енергії як основного джерела теплоти;
- можливість часткового або повного графітування оброблюваної сировини.

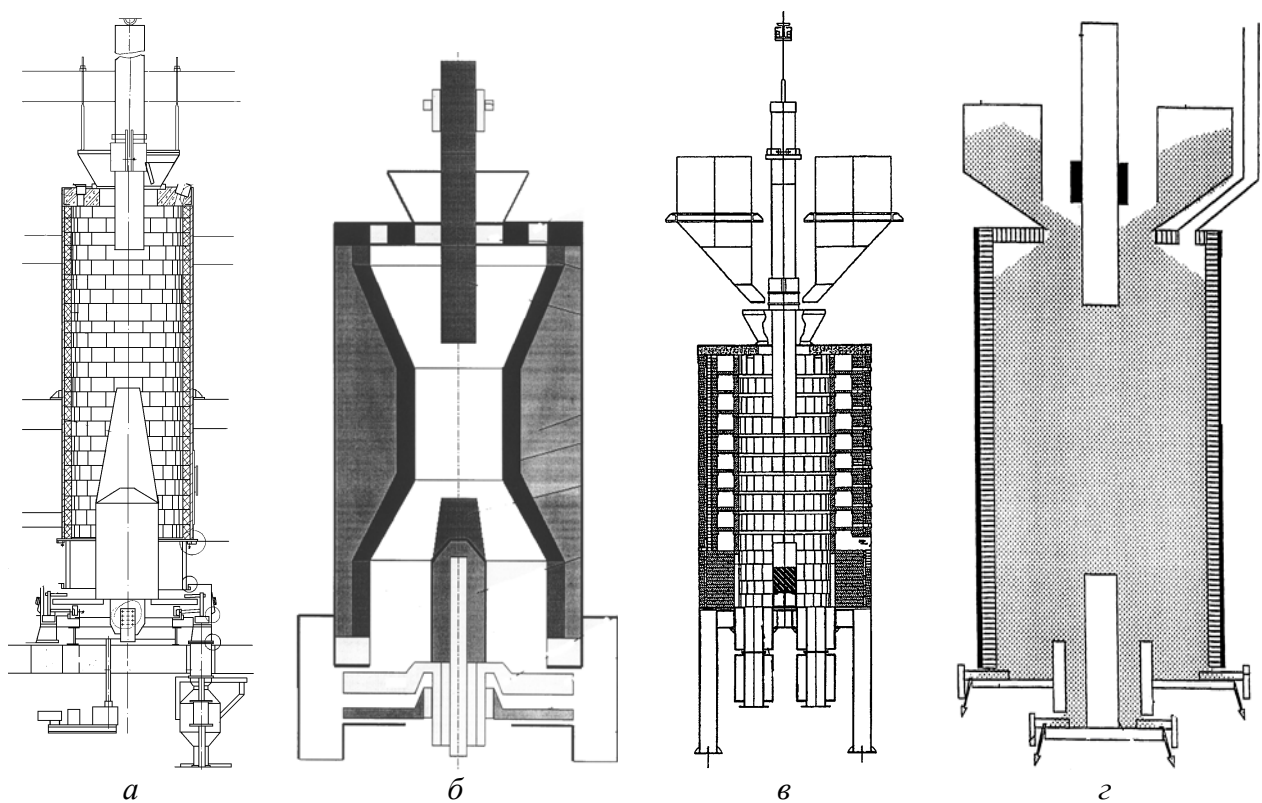


Рис. 1.2. Конструкції електрокальцинаторів:

а – рядовий двостадійний електрокальцинатор; б – електрокальцинатор з дроселювальним пристроєм; в – електрокальцинатор з периферійним нагрівом теплотою згорання летючих газів; г – електрокальцинатор з подвійним вивантаженням матеріалу

Класична технологія отримання графітованого наповнювача електродної продукції ґрунтується на багатостадійному процесі виробництва нуделя (основні стадії процесу: помел сирого коксу, прожарювання в обертових печах, помел прожареного коксу, приготування суміші, пресування заготовки нуделя, випалювання нуделя в печах Рідгамера, графітування нуделя в печах Ачесона, помел нуделя), яка є трудомісткою та енергоємною [12–14, 28, 30].

Також відомий спосіб отримування якісного наповнювача для вуглецевої продукції, що полягає у нагріванні антрациту теплотою, що виділяється під час графітування електродної продукції [32].

Можливість застосування шахтної печі до безперервного процесу графітування коксу є надзвичайно привабливою як з боку вагомого зменшення стадій технологічного циклу з 8-и до 4-х (помел сирого коксу, прожарювання в обертових печах, неперервне графітування в шахтній електропечі, помел графітованого коксу), так і з боку зменшення питомої витрати електроенергії (ПВЕ). Так, тільки при графітуванні нуделя в печах Ачесона, ПВЕ становлять біля 4500 кВт·год/т, а за оцінками [29] ПВЕ при графітуванні нафтового коксу у шахтній печі становить біля 2000 кВт·год/т.

Відповідно, для ефективного впровадження технології отримання графітованого наповнювача ЕВ в електрокальцинаторі необхідно розробити конструкцію електропечі, що дає змогу на шляху руху оброблюваного матеріалу сформувати зону прожарювання з температурою не нижче 2200 °С і при цьому забезпечити стабільну та тривалу експлуатацію обладнання. Необхідний рівень температури прожарювання матеріалу визначається за допомогою лабораторних досліджень і залежить від фізичних властивостей вихідного матеріалу.

Аналіз літературних джерел [14, 28] свідчить, що на даний час технологія отримання графітованого наповнювача ЕВ в електропечах шахтного типу відпрацьована недостатньо, а в Україні зовсім відсутня. Тому задача розробки нової технології одержання графітованого коксу та відповідного технологічного обладнання є надзвичайно актуальною.

Представлені в праці [30] експериментальні й числові дослідження температурних та електричних режимів роботи рядових електрокальцинаторів показали, що при створенні електрокальцинатора з конструкцією, що задовольняє вказаним вимогам необхідно вирішити завдання спрямовані на:

- зменшення нерівномірності електричного i , як наслідок, температурного поля в горизонтальних перетинах електрокальцинатора;
- створення надійної системи управління електроживленням електрокальцинатора, що забезпечує мінімізацію нерівномірності в розподілі електричного струму в оброблюваному матеріалі;

- організація шляху проходження матеріалу крізь робочий простір електропечі, який забезпечить перебування усієї сировини в зоні прожарювання з максимальним рівнем температури;
- вирішення проблеми вигорання вогнетривкої футеровки в зонах найбільшого термічного навантаження;
- усунення нестабільності електричних характеристик процесу електрокальцинування, що пов'язана з дискретністю роботи механізму завантаження/вивантаження.

У праці [31] представлено результати та аналіз патентних досліджень конструкцій електрокальцинаторів для графітування вуглецевих матеріалів. Показано, що проблема створення конструкції електрокальцинатора для графітування вуглецевого матеріалу, у якій реалізуються всі вище сформульовані вимоги, залишається не вирішеною.

1.2. Математичне моделювання теплоелектричного стану шахтної електропечі

Розробка нових технологічних процесів термоброблення та промислового високотемпературного обладнання являє собою складний та багатоетапний процес. Сучасний стан економіки, науки і техніки диктує нові підходи до вирішення даної задачі. Швидкість, точність і мінімальні витрати праці і матеріальних ресурсів – це основні вимоги сучасного підходу до розробки нових, а також до підвищення ефективності діючих технологічних процесів та обладнання.

Застосування числового аналізу з використанням новітніх обчислювальних ресурсів та програмного забезпечення може забезпечити вищезазначені вимоги на належному рівні. Даний інструмент дозволяє: проводити аналіз нових технічних рішень ще на початкових стадіях проекту, відбираючи найбільш ефективні з них; оцінити вплив численних окремих факторів на кінцевий результат і підбирати співвідношення вхідних параметрів з метою забезпечення раціональних режимів роботи обладнання; дає можливість зазирнути глибше у фізичні і технологічні процеси та визначити величини, які складно, а іноді й не можливо, знайти експериментальним шляхом. Це і обумовлює широке застосування числового аналізу для наукових, дослідницьких, технологічних та проектувальних завдань.

Високотемпературне оброблення в електрокальцинаторі супроводжується складними та пов'язаними між собою фізичними процесами: складним рухом сипучого матеріалу, спричиненим силами гравітації та механізмом розвантажування; рухом летючих у зворотному напрямі;

проходженням струму в електропровідних елементах конструкції та самому матеріалі; складним теплообміном в середині і зовні печі. Отже, математична модель електрокальцинатора повинна враховувати зазначені процеси.

Моделюванню температурних та електричних полів у електрокальцинаторах присвячені праці [33–39]. У праці [33] на основі побудованої математичної моделі теплового та електричного режимів з використанням методу скінченних елементів представлено результати числового моделювання з розподілу полів температури, теплового потоку, електричної (активної) потужності і потенціалу в реальних умовах роботи промислового електрокальцинатора. Електрокальцинатор розглядається у спрощеному вигляді як вертикальна циліндрична футерована піч, уздовж осі якої розташовані два електроди (верхній і нижній). Фізичні поля отримано із розв'язку системи диференціальних рівнянь у частинних похідних, що складається з нестационарного рівняння теплопровідності з внутрішнім джерелом теплоти та квазістационарного рівняння електричного потенціалу. Відповідно до математичного формулювання задачі, нагрівання сипучого матеріалу відбувалося за рахунок джоулевої теплоти. Однак, у розрахунках автори статті [33] нехтували рухом сипучого матеріалу; зміною маси сипучого матеріалу та його нагрівання за рахунок згоряння летючих, що виділяються з матеріалу; температурною залежністю фізичних властивостей матеріалів та ін. Аналіз наведених у зазначеній праці розрахункових даних показав, що максимум температури сипучого матеріалу для дослідженої системи має місце біля робочого кінця нижнього електроду (2300–2370) °С, у той час як на торці верхнього електроду температура складає близько (1900–2000) °С. Отримані результати показують, що з точки зору вогнетривкості футеровки найбільш проблемною є її ділянка, що розташована біля робочого торця нижнього електроду.

У праці [34] досліджена можливість водяного охолодження електрокальцинатора з метою зниження температури стінки футеровки. Розглядається охолодження циліндричної поверхні по всій довжині печі за рахунок водяного плівкового охолодження та вільної конвекції.

Комп'ютерне моделювання термічного оброблення антрациту в електрокальцинаторі типу ИЕТ-10-УХЛЧ на ПАТ «Укрграфіт» наведено у статті [35]. У праці досліджено вплив глибини занурення верхнього електроду в антрацитове завантаження на температурне поле, напруженість електричного поля та положення і напрям векторів густини струму.

У праці [36] наведено узагальнення раніше проведених теоретичних і експериментальних досліджень на електрокальцинаторах ПАТ «Укрграфіт». Математична модель процесу термооброблення матеріалу, що розглядалася в попередніх працях цих же авторів [36–38], доповнена рівняннями

електродинаміки Максвела. Електричні режими електрокальцинатора розраховувалися для електроживлення змінним струмом.

У працях [37–38] наведено математичну модель теплоелектричного та гідродинамічного стану електрокальцинатора типу Elkem, яка була використана для мінімізації перепаду робочих температур у радіальному напрямі та підвищення загальної продуктивності агрегату.

У праці [39] приведено фізичну та математичну модель, що описує високотемпературне оброблення нафтового коксу в електрокальцинаторі. Модель має такі припущення: електричне поле в печі вважають безвихровим; термоелектричними ефектами нехтують; усі матеріали вважають ізотропними. Процес графітування нафтового коксу в шахтній електропечі описується системою диференціальних рівнянь у частинних похідних із використанням багатофазної моделі Ейлера і теплоелектричного стану, що містить рівняння нерозривності, збереження руху та енергії та квазістаціонарної електропровідності. Також наводяться початкові та граничні умови. Дана модель дає можливість теоретично дослідити процес високотемпературної обробки нафтового коксу у шахтній електричній печі та відпрацювати технологічний регламент пускового й робочого режимів.

Загалом у запропонованих різними авторами математичних моделях не враховуються такі важливі особливості процесу термооброблення як динаміка сипучого середовища та хімічна взаємодія при високій температурі, а їх застосування обмежено областю, у якій виконувалася оцінка їх адекватності.

1.3. Моделювання статички та динаміки сипучих матеріалів

Матеріали, що оброблюється в електрокальцинаторі, є сипучими речовинами, тому принцип роботи цього агрегату ґрунтується на законах руху сипучого середовища в робочому просторі печі.

Сипуче середовище складається з великої кількості твердих часточок, які втрачають та здобувають механічну енергію через взаємодію між собою. За характером поведінки ці матеріали займають проміжне положення між рідинами та твердими тілами. Сипуче середовище може проявляти такі характерні властивості як сегрегація за динамічного руху, утворення на вільній поверхні хвиль та брижі під час прикладання вібраційного навантаження, спонтанне запирання матеріалу на виході із каналу, можливість пластичного деформування при стисканні [40–42] та ін.

Багато особливостей поведінки сипучих матеріалів пов'язані з тим, що на відміну від звичайних рідин, кінетична енергія матеріалу (гранульна температура), яка пов'язана з відносним рухом макроскопічних частинок, є змінною [43]. Ця енергія безперервно та незворотно переходить у внутрішні ступені свободи через механізм зіткнень. Також кожна гранула має низьке

значення внутрішньої енергії, що не дозволяє їй самовільно рухатися, як у рідинах чи газах. Тому система частинок буде рухатися тільки у разі прикладення зовнішньої сили.

Натепер фізика сипучого середовища залишається недостатньо вивченою галуззю науки і тому ставить багато запитань.

Багато наукової літератури присвячено статичі та динаміці сипучих матеріалів. Методологія визначення реологічних властивостей сипучих матеріалів представлена у наукових працях [44, 45], у яких проаналізовано властивості, які є критичними для оцінки текучості сипучих матеріалів, наведені сучасні методи вимірювання цих властивостей тощо.

У праці [46] на прикладі декількох матеріалів (карбід кремнію, борошно), показано вплив мікропараметрів (розмір частинок, гранулометрія, форма гранул) на макроскопічні властивості системи.

Найчастіше питання статичи сипучих середовищ розглядається на прикладі гірки матеріалу. Відоме явище утворення конічної гірки на горизонтальній поверхні, має зв'язок з фізичними властивостями середовища, а саме з внутрішнім коефіцієнтом тертя, фракційним складом, формою окремих гранул тощо. Кут між гіркою та горизонтальною поверхнею, який дістав назву кут природного укусу (КПУ), використовується як зручний для вимірів параметр, що характеризує поведінку матеріалу у стані спокою [41].

Питанню визначення КПУ присвячені праці [46, 47], у яких розглянуто методи проведення експериментальних досліджень, проаналізовано особливості та недоліки методів, наведені результати вимірів.

Вивчення руху сипучого середовища є складним і потребує вирішення комплексу питань, що виникають під час досліджень. У праці [48] відмічається, що часто рух гранул розділяють на три основних класи. Перший – це квазістатичний режим, коли сипучий матеріал майже не рухається і можна знехтувати силами інерції. Тут виправдано використання пластичних моделей механіки суцільного середовища. Другий – це газоподібний режим руху, коли основна сила, яка діє на частинки – це сила взаємодії з середовищем (наприклад, рух пилу в газовому потоці), а контактною взаємодією між частинками нехтують. У цьому разі кінетична теорія, подібна до кінетичної теорії газів, адекватно описує даний режим руху. Проміжне положення між цими режимами займає так званий щільний рух гранул, яскравим прикладом якого є переміщення матеріалу у бункері або в каналах різного поперечного перерізу, в тому числі і в електрокальцинаторі. Сипучий матеріал займає майже весь об'єм, у якому рухається, а взаємодія всередині нього обумовлена тертям та контактом між частинками. Рух матеріалу в цьому випадку подібний до потоку рідини, але має певні особливості.

У працях [48–50] описані експериментальні та теоретичні дослідження щільного потоку сипучого середовища на деяких простих прикладах. На рис. 1.8 наведено такі схеми руху сипучого матеріалу: плоский зсув між паралельними пластинами; елемент Куетта – концентричний зсув, створений обертовим циліндром; вертикальний рух між двома пластинами; рух на похилій площині з утворенням вільної поверхні; рух на вільній поверхні гірки матеріалу; обертання барабана з сипучим матеріалом.

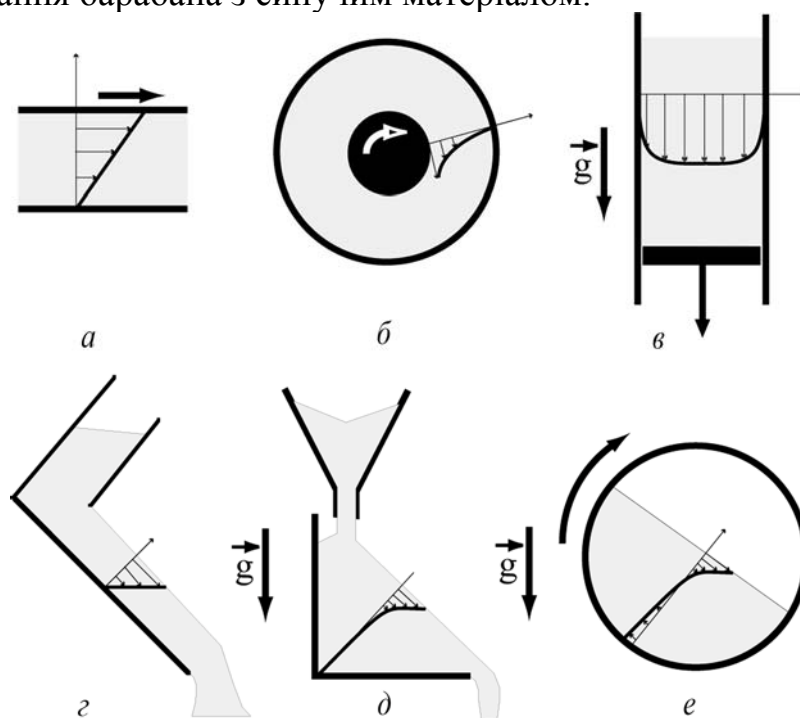


Рис. 1.8. Різноманітні приклади щільного руху сипучого матеріалу [51]:
 а – плоский зсув між паралельними пластинами; б – концентричний зсув; в – вертикальний рух між двома пластинами; г – рух на похилій площині з утворенням вільної поверхні;
 д – рух на вільній поверхні гірки матеріалу; е – обертання барабану з сипучим матеріалом

У праці [51] наведений детальний огляд сучасної літератури, стосовно вищезгаданих задач. Автори приводять дані, як експериментальні, так і теоретично-розрахункові з різних джерел, що зведені до однієї системи відліку. Аналіз цих даних дає можливість виділити важливі характеристики щільного потоку гранул.

Особливий інтерес представляє характер руху сипучих матеріалів у щілинному каналі під дією гравітації. Досить часто така задача розглядається як рух між двома паралельними шорсткими поверхнями, рух контролюється швидкістю опускання днища вимірювальної установки або геометричної стінки в моделі (рис. 1.9). Ця задача може розглядатися як псевдо-плоска і тому зручна для аналізу та розрахунків (див. рис. 1.9).

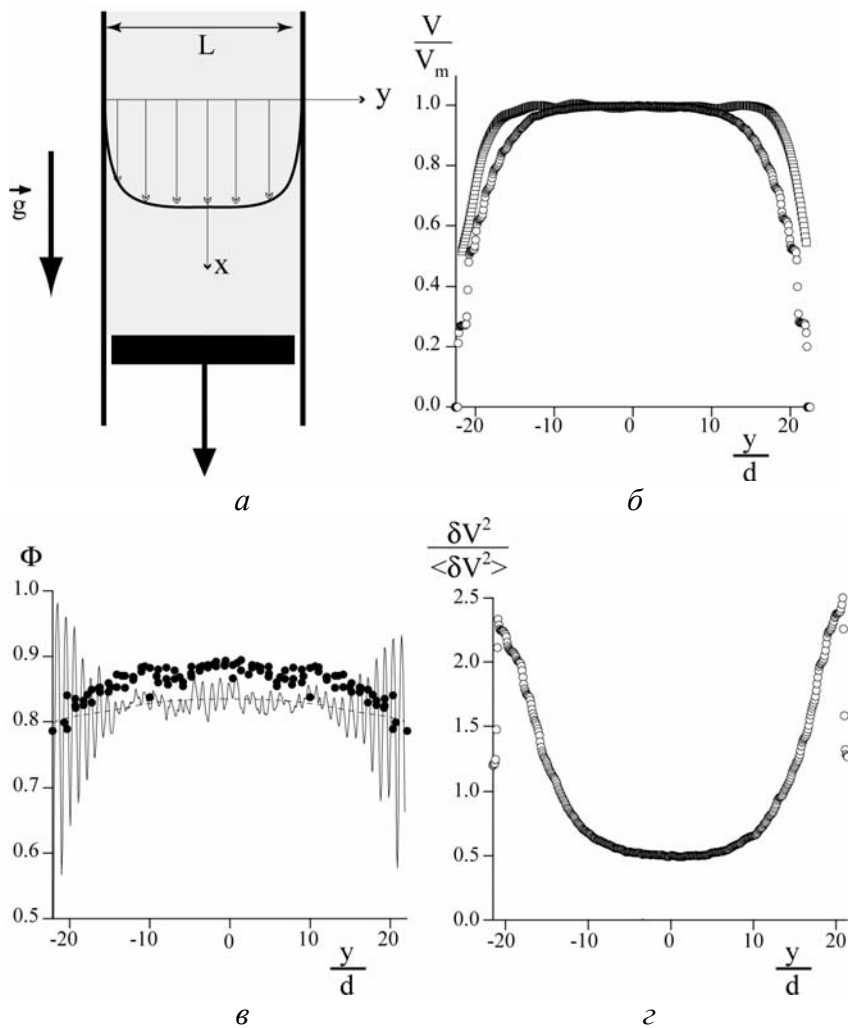


Рис. 1.9. Результати розрахунків динаміки сипучого середовища у щілинному каналі [51]
 а – постановка задачі; б – безрозмірний профіль швидкості; в – об'ємна частка;
 г – флуктуація швидкості

Характеризуючи результуючий профіль швидкості гранул, можна відмітити таке: середина потоку рухається прямолінійно – поршневий потік, а біля шорсткої стінки присутня тонка зона прямолінійного зсуву.

У працях [51, 52, 53] проведено вивчення впливу різних параметрів на профіль швидкості гранул. Важливим є те, що профіль швидкості не залежить від витрати сипучого матеріалу чи розміру каналу. Але швидкість біля стінки та товщина зони прямолінійного зсуву значною мірою залежить від її шорсткості. Результати розрахунків профіля швидкості сипучого матеріалу наведені на рис. 1.10, у яких шорсткість створювалася завдяки закріпленню до неї гранул сферичної форми визначеного розміру, а при моделюванні роль стінки виконували нерухомі гранули визначеного розміру.

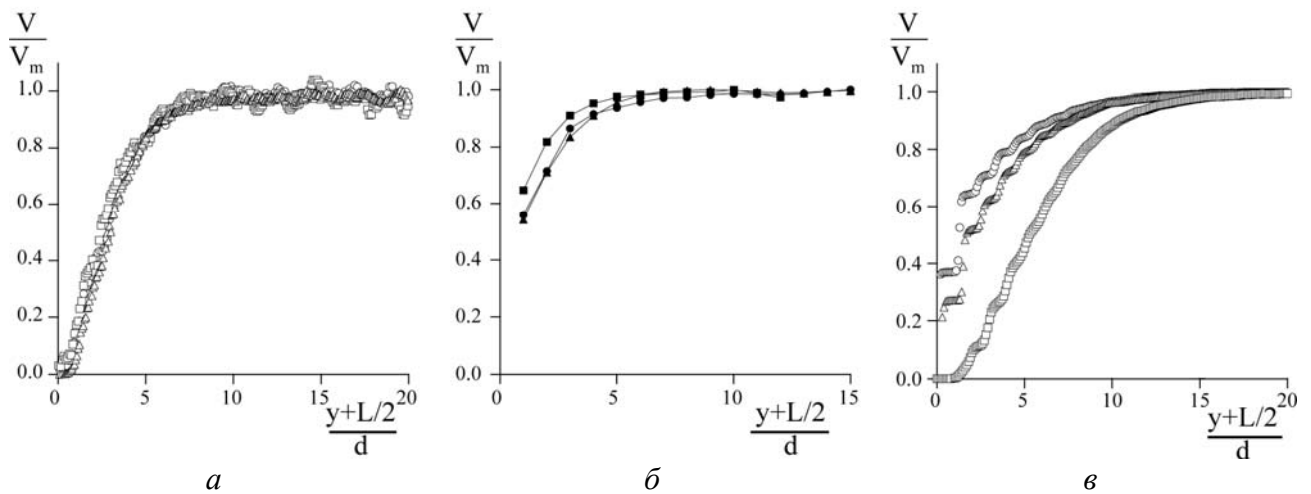


Рис. 1.10. Вплив різних параметрів на розрахований безрозмірний профіль швидкості сипучого матеріалу [51]:

a – вплив витрати матеріалу; *б* – вплив ширини каналу; *в* – вплив жорсткуватості стінки

Враховуючи особливості поведінки сипучого середовища, числове моделювання даного класу матеріалів вимагає застосування нових або змінення відомих методів. Для математичного описання фізичних полів статички та динаміки сипучих матеріалів, широкого застосування дістали три моделі: перша – модель механіки суцільного середовища (як суміші твердих частинок та газу з ефективними властивостями), друга – багатофазна модель Ейлера і третя – дискретна модель.

У моделях суцільного середовища система з великої кількості окремих частинок замінюються на суцільне, нерозривне середовище (континуум) і такі величини як швидкість і густина представляються як згладжені функції координат і часу. При цьому закон збереження постулюється для кожного із рівнянь збереження маси, лінійного і кутового руху, енергії [41, 54].

Диференціальна форма рівняння збереження маси або рівняння нерозривності має вид

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0, \quad (1.5)$$

де ρ – густина, кг/м^3 ; τ – час, с ; ∇ – оператор Гамільтона, м^{-1} ; \mathbf{v} – вектор швидкості, м/с .

Диференціальна форма рівняння збереження лінійного руху

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \tau} = -\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{b}, \quad (1.6)$$

де $\boldsymbol{\sigma}$ – тензор напружень, Па ; \mathbf{b} – вектор масової сили, Н/кг .

Використовуючи рівняння збереження маси (1.5) рівняння (1.6) можна переписати як

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{b}, \quad (1.7)$$

У випадку нелокалізованого крутного моменту рівняння збереження кутового руху повністю задовольняють вимоги симетрії, тобто

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}^T. \quad (1.8)$$

В іншому випадку це призводить до асиметричного тензору напружень Піюли.

Нехтуючи радіаційним теплообміном, для балансу енергії можна записати рівняння збереження енергії у вигляді

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(\hat{U} + \frac{1}{2} |\mathbf{v}|^2 \right) \right] + \nabla \cdot \left[\rho \mathbf{v} \left(\hat{U} + \frac{1}{2} |\mathbf{v}|^2 \right) \right] = -\nabla \cdot (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{v}) + \rho \mathbf{b} \cdot \mathbf{v} - \nabla \cdot \mathbf{q}, \quad (1.9)$$

де \hat{U} – масова внутрішня енергія, Дж/кг; $\frac{1}{2} |\mathbf{v}|^2 = \frac{m |\mathbf{v}|^2}{2m}$ – масова кінетична енергія, Дж/кг; \mathbf{q} – вектор густини теплового потоку, Вт/м².

Члени $-\nabla \cdot (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{v})$ і $\rho \mathbf{b} \cdot \mathbf{v}$ представляють швидкість виконання роботи на одиницю об'єму матеріалу за допомогою напружень і масових сил, відповідно; член $-\nabla \cdot \mathbf{q} = -\text{div} \mathbf{q}$ представляє дивергенцію вектора густини теплового потоку теплопровідністю і є показником того чи дана точка середовища (поля) є джерелом або стоком теплоти: $\text{div} \mathbf{q} > 0$ – точка поля є джерелом; $\text{div} \mathbf{q} < 0$ – точка поля є стоком; $\text{div} \mathbf{q} = 0$ – стік і джерело відсутні або компенсуються один одним.

Рух сипучого середовища можна розглядати як динамічну багатофазну систему, що складається із рідких та твердих фаз [55–60]. Для того, щоб описати поведінку даної системи використовується наближення системи рівнянь Ейлера. Найбільш поширений підхід при математичному моделюванні твердої фази є її опис за допомогою кінетичної теорії потоку гранул.

Описання багатофазного потоку як взаємно проникного континуума об'єднує поняття об'ємної частки фази α_q . Об'ємні частки представляють собою зайнятий простір кожною фазою і рівняння збереження маси, збереження кількості руху, енергії і хімічних компонент записуються для кожної фази окремо.

Об'ємна частка з індексом q визначається співвідношенням

$$V_q = \int_V \alpha_q dV, \quad (1.9)$$

$$\text{де } \sum_{q=1}^n \alpha_q = 1; \quad (1.10)$$

n – кількість фаз в потоці; V – об'єм, м³.
Ефективна густина фази q визначається як

$$\hat{\rho}_q = \alpha_q \rho_q, \quad (1.11)$$

Для об'ємної частки кожної фази отримуємо такі рівняння нерозривності

$$\frac{1}{\rho_{rq}} \left\{ \left[\frac{\partial(\alpha_q \rho_q)}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q) \right] = \sum_{q=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \right\}, \quad (1.12)$$

де ρ_{rq} – середня густина фази q , кг/м³; α_q – об'ємна частка фази q ; ρ_q – густина фази q , кг/м³; τ – час, с; ∇ – оператор Гамільтона, м⁻¹; \mathbf{v}_q – вектор швидкості фази q , м/с; \dot{m}_{pq} і \dot{m}_{qp} – характеристики передачі маси з фази p у фазу q і навпаки, відповідно, (причому $\dot{m}_{ii} = 0$), кг/(с·м³); n – кількість фаз у потоці.

Рівняння (1.12) розв'язується для другої фази q , а об'ємна частка першої фази розраховується з умови, що сума об'ємних часток всіх фаз дорівнює одиниці.

Рівняння збереження кількості руху для фази q має вигляд

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q)}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q \mathbf{v}_q) = -\alpha_q \nabla p - \nabla p_q + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}_q + \\ & + \alpha_q \rho_q \mathbf{g} + \sum_{p=1}^n [K_{pq} (\mathbf{v}_p - \mathbf{v}_q) + \dot{m}_{pq} \mathbf{v}_{pq} - \dot{m}_{qp} \mathbf{v}_{qp}] + \\ & + (\mathbf{F}_q + \mathbf{F}_{vm,q}), \end{aligned} \quad (1.14)$$

де p – тиск суміші, Па; p_q – тиск твердих частинок у випадку фази з твердих гранул, Па; $\bar{\bar{\tau}}_q$ – тензор напружень фази q (Па)

$$\bar{\tau}_q = \alpha_q \mu_q [\nabla(\mathbf{v}_q) + \nabla(\mathbf{v}_q^T)] + \alpha_q \left(\lambda_q - \frac{2}{3} \mu_q \right) \nabla \cdot \mathbf{v}_q \mathbf{I}, \quad (1.15)$$

де μ_q і λ_q – зсувна та об’ємна в’язкості фази q , відповідно, Па·с; \mathbf{F}_q – зовнішня об’ємна сила, Н/м³; \mathbf{g} – вектор прискорення вільного падіння, м/с²; $\mathbf{F}_{vm,q}$ – віртуальна масова сила, що віднесена до об’єму, Н/м³; \mathbf{v}_{pq} – вектор швидкості міжфазної поверхні, яка дорівнює \mathbf{v}_p , якщо маса передається від фази p до фази q і \mathbf{v}_q у зворотному випадку, м/с; K_{pq} – коефіцієнт обміну кількістю руху між фазами, що залежить від тертя, тиску, зчеплення частинок та інших чинників, кг/(м³·с).

Для стисливого потоку гранул, коли їх об’ємна частка менша за максимально допустиме значення, тиск твердих частинок розраховується окремо та використовується для визначення ∇p_q у рівнянні (1.15). Тиск твердих частинок визначається із співвідношення

$$p_s = \alpha_s \rho_s \Theta_s + 2\rho_s (1 + e_{ss}) \alpha_s^2 g_{0,ss} \Theta_s, \quad (1.16)$$

де e_{ss} – коефіцієнт відновлення після зіткнення частинок; Θ_s – гранульна температура, Дж/кг; $g_{0,ss}$ – функція радіального розподілу вірогідності зіткнення між гранулами.

У моделі Ейлера напруження у твердій фазі визначаються по аналогії між випадковим рухом частинок і тепловим рухом молекул всередині газу. Інтенсивність флуктуації швидкості описується за допомогою псевдо-теплової температури або гранульної температури Θ , пропорційної нормальній флуктуації частинки. Рівняння для гранульної температури отримано із кінетичної теорії газів і має вигляд

$$\frac{3}{2} \left[\frac{\partial(\rho_s \alpha_s \Theta_s)}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho_s \alpha_s \mathbf{v}_s \Theta_s) \right] = (-p_s \mathbf{I} + \bar{\tau}_s) : \nabla \mathbf{v}_s + \nabla \cdot (k_{\Theta_s} \nabla \Theta_s) - \gamma_{\Theta_s} + \phi_{ls}, \quad (1.17)$$

де $(-p_s \mathbf{I} + \bar{\tau}_s) : \nabla \mathbf{v}_s$ – генерація енергії, що пов’язана з тензором напружень твердих частинок, Вт/м³; $(:)$ – оператор подвійного скалярного добутку; $\nabla \cdot (k_{\Theta_s} \nabla \Theta_s)$ – дифузія енергії (k_{Θ_s} – коефіцієнт дифузії), Вт/м³; γ_{Θ_s} – дисипація енергії зіткнення твердих частинок, Вт/м³; ϕ_{ls} – передача енергії між рідкою фазою l і твердою фазою s , Вт/м³.

Рівняння (1.17) вміщує член $k_{\Theta_s} \nabla \Theta_s$, який описує потік дифузії енергії гранул. Коефіцієнт дифузії k_{Θ_s} описується таким співвідношенням

$$k_{\Theta_s} = \frac{15d_s \alpha_s \rho_s \sqrt{\pi \Theta_s}}{4(41-33\eta)} \left[1 + \frac{12}{5} \eta^2 (4\eta-3) \alpha_s g_{0,ss} + \frac{16}{\pi 15} \eta (41-33\eta) \alpha_s g_{0,ss} \right], \quad (1.18)$$

де

$$\eta = \frac{1}{2} (1 + e_{ss}), \quad (1.19)$$

d_s – середній діаметр частинок, м.

Член γ_{Θ_s} представляє швидкість дисипації енергії гранул всередині твердої фази s завдяки їх зіткнення

$$\gamma_{\Theta_s} = \frac{12(1 + e_{ss}^2) g_{0,ss}}{\sqrt{\pi} d_s} \rho_s \alpha_s^2 \Theta_s^{\frac{3}{2}}. \quad (1.20)$$

Закон збереження енергії записується у вигляді рівнянь збереження енергії для кожної фази

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\alpha_q \rho_q h_q)}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q h_q) = -\alpha_q \frac{\partial p_q}{\partial t} + \bar{\bar{\tau}}_q : \nabla \mathbf{v}_q - \\ - \nabla \cdot \mathbf{q}_q + \sum_{p=1}^n (\mathbf{Q}_{pq} + \dot{m}_{pq} h_{pq} - \dot{m}_{qp} h_{qp}) + S_q, \end{aligned} \quad (1.21)$$

де h_q – масова ентальпія фази q , Дж/кг; \mathbf{q}_q – вектор теплового потоку, Вт/м²; S_q – об’ємна теплота хімічних реакцій, Вт/м³; \mathbf{Q}_{pq} – вектор інтенсивності передачі теплоти між фазами p і q (причому $Q_{ii} = 0$), Вт/м³; h_{pq} – ентальпія поверхні, Дж/кг.

Дискретне уявлення про сипучий матеріал є найбільш адекватним з точки зору механіки сипучого середовища. За цього підходу розглядається рух кожної окремої частинки та її взаємодія з усіма сусідніми частинками та границями розрахункової області. Цей клас методів отримав назву Методу Молекулярної Динаміки (Molecular dynamics) або Метода Дискретного Елемента (МДЕ) (Discrete element method). Метод був запропонований та описаний у працях таких авторів, як: Cundall & Starck, Haff, Herrmann, Walton та ін. [61–65].

В основі МДЕ лежить баланс механічного руху частинки сипучого матеріалу

$$\begin{cases} m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{d\tau} = \mathbf{F}_i; \\ I_i \frac{d\boldsymbol{\omega}_i}{d\tau} = \mathbf{T}_i, \end{cases} \quad (1.22)$$

де m_i – маса частинки i , кг; \mathbf{v}_i – вектор лінійної швидкості центра маси частинки i , м/с; I_i – момент інерції частинки i , кг·м²; $\boldsymbol{\omega}_i$ – вектор кутової швидкості частинки i , рад/с; \mathbf{F}_i – сумарна зовнішня сила, що діє на частинку i , Н; τ – час, с; \mathbf{T}_i – сумарний зовнішній крутний момент, що діє на частинку i , Н·м.

Система рівнянь (1.22) інтегрується за часом з відповідними початковими та граничними умовами, у результаті чого визначаються прискорення, швидкість та переміщення кожної частинки.

Застосування МДЕ потребує значних розрахункових потужностей, але сучасний стан комп'ютерної техніки та можливості паралельних обчислень роблять можливим його застосування для розрахунків повномасштабних промислових процесів та обладнання. Зокрема у праці [66] наведені приклади застосування МДЕ для таких складних задач, як: перемішування, класифікація, транспортування, помел, дозування, зберігання, задачі геофізики, механіки ґрунтів тощо.

1.4. Висновки та завдання досліджень

Аналіз особливостей і показників виробництва прожареного антрациту та графітованого коксу, експериментальних досліджень і математичного моделювання, виконаний на підставі вивчення літературних джерел, показує:

- графіт є найбільш стійкою і поширеною формою вуглецю у звичайних умовах. Підвищені механічні властивості графіту при нагріванні до високих температур обумовлюють його вибір як матеріалу для умов, де необхідні висока термостійкість і електропровідність. Це, наприклад, електротермія, чорна та кольорова металургія, хімічна промисловість, атомна енергетика та ін.;

- вуглеграфітові та графітовані (штучний графіт) ЕВ отримують із вуглецевмісних матеріалів – твердого наповнювача (прожарений антрацит або графітований кокс) і зв'язувального (різні види пеків). Технологічний ланцюг промислового виробництва графітованих ЕВ включає такі основні етапи: приготування вуглецевої маси і її пресування у заготовки, попереднє випалювання заготовок у газових печах та графітування в електропечах

непрямого або прямого нагріву. Технологічний процес виготовлення вуглеграфітових ЕВ закінчується на стадії випалювання;

– основними вимогами, що пред'являються до наповнювачів, є необхідність гарного змочування зв'язувальним, висока електропровідність, механічна та термічна міцність. Властивості наповнювача суттєво впливають на експлуатаційні характеристики ЕВ. Сировиною для наповнювача служать кокси (нафтові, пекові, кам'яновугільні та ін.), антрацити, термоантрацити. На електродному виробництві використовують два основних типи наповнювача – прожарений (пройшов термообробку при більше ніж 1100 °С) та графітований (при більше ніж 2000 °С);

– технологія високотемпературного оброблення сипучих вуглецевих матеріалів в електричних печах – електрокальцинаторах має значні переваги та можливості для подальшого розвитку порівняно з іншими способами;

– матеріали, що оброблюються в електрокальцинаторі, є сипучими матеріалами. Тому принцип роботи даного агрегату ґрунтується на законах руху сипучого середовища в робочому просторі печі. Сипуче середовище займає проміжне положення між рідинами та твердими тілами, а фізика гранул має свої особливості. Тому при математичному описі процесів в електрокальцинаторі необхідно враховувати динаміку та статичку сипучого середовища;

– для математичного описання фізичних полів статички та динаміки сипучих матеріалів, широкого застосування дістали три моделі: модель механіки суцільного середовища; багатозадачна модель Ейлера; дискретна модель. Дискретне уявлення про сипучий матеріал є найбільш близьким з точки зору механіки сипучого середовища;

– МДЕ – це числовий метод для розв'язання задач статички та динаміки сипучого середовища при дискретному уявленні про цей процес. МДЕ отримав застосування для розв'язання широкого спектру задач, для розрахунків процесів та обладнання, пов'язаних з даним класом матеріалів.

Проведений аналіз літературних джерел показав актуальність створення наукових засад з розробки ефективних процесів та обладнання для високотемпературної обробки сипучих вуглецевих матеріалів в електричних печах, що забезпечують високоякісний кінцевий продукт, ресурсо- і енергозбереження та зменшення техногенного впливу на навколишнє середовище.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані такі завдання:

1. Проаналізувати стан питання теплоелектричного стану діючих типів електрокальцинаторів для високотемпературного оброблення сипучих вуглецевих матеріалів, обґрунтувати доцільність модернізації, впровадження нових конструкцій та технологічних режимів їх експлуатації.

2. Розробити узагальнену математичну модель фізичних полів процесу високотемпературного оброблення рухомого шару сипучих вуглецевих матеріалів в електропечах з урахуванням динаміки рухомого середовища та теплоти хімічних реакцій.

3. Розробити методику числового розв'язання сформульованої задачі на базі методів: дискретного елемента (МДЕ), осереднення швидкості руху сипучого середовища, скінченних об'ємів (МСО) та розробити програмне забезпечення (ПЗ) для розв'язання сформульованої задачі.

4. Виконати дослідження статичної та динамічної сипучого середовища на прикладі антрациту та нафтового коксу за допомогою натурних та числових експериментів.

5. Виконати експериментальні дослідження теплоелектричних властивостей антрациту та нафтового коксу.

6. Провести експериментальні випробування технологічного циклу термооброблення вуглецевих матеріалів на електрокальцинаторах діючих конструкцій.

7. На базі сформованих математичних моделей та ПЗ розробити числові моделі електрокальцинаторів діючих конструкцій для прожарювання антрациту та графітування нафтового коксу, виконати їх апробацію та верифікацію.

8. Визначити за допомогою розроблених числових моделей закономірності і вплив на теплоелектричний стан та технологічні показники процесу термооброблення сипучих вуглецевих матеріалів в електрокальцинаторах таких параметрів як дизайн дроселювального пристрою – дросель-шайби, геометричні характеристики дросель-шайби, активна електрична потужність, продуктивність.

9. Розробити та впровадити на ПАТ «Укрграфіт» ресурсо- та енергозберігаючий технологічний регламент пуску та експлуатації електрокальцинатора для прожарювання антрациту, що забезпечить потрібну якість кінцевого продукту та довготривалу експлуатацію обладнання.

10. Розробити конструкцію електрокальцинатора, що дозволить проводити неперервний процес графітування нафтового коксу.

2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОБРОБЛЕННЯ РУХОМОГО ШАРУ СИПУЧОГО МАТЕРІАЛУ В ЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕЧАХ

2.1. Постановка задачі

Фізична модель процесу високотемпературного оброблення сипучих вуглецевих матеріалів в електропечі може бути розглянута на прикладі рядового електрокальцинатора (рис. 2.1,*а*) чи електрокальцинатора з дросель-шайбою (рис. 2.1,*б*) для прожарювання антрациту. Конструктивно електрокальцинатор представляє собою сталеву обичайку (кожух), яка футерована вогнетривкими і теплоізоляційними матеріалами, у верхній та нижній торцевих частинах якої знаходяться графітові електроди.

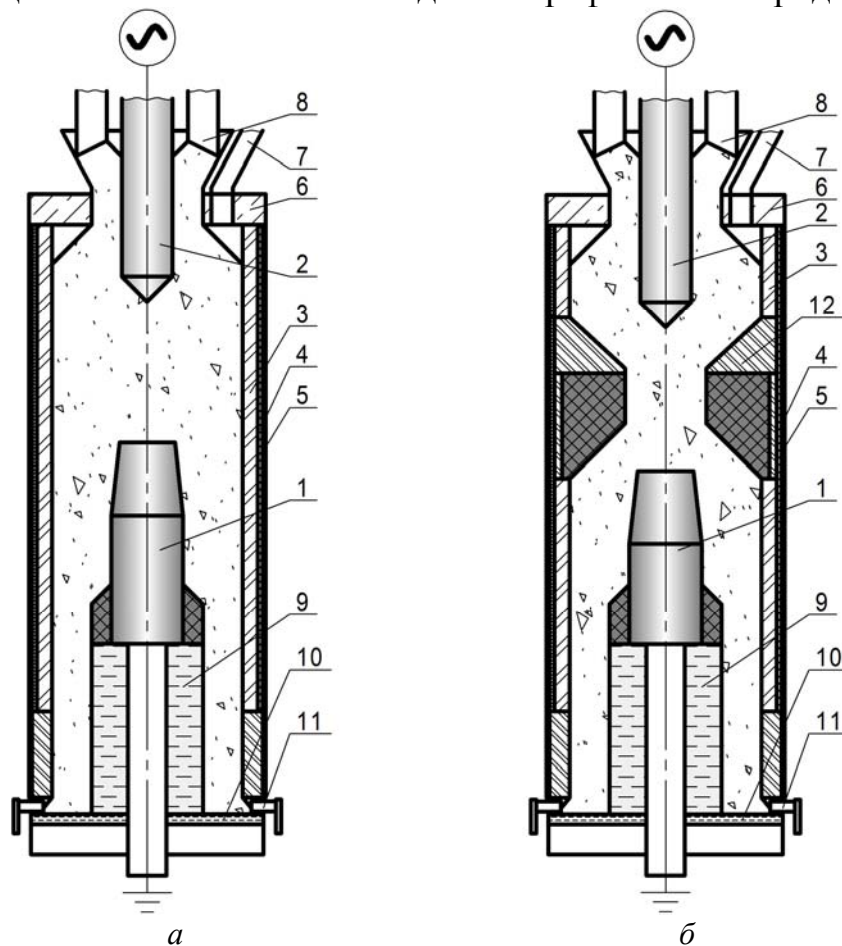


Рис. 2.1. Схема електрокальцинатора для прожарювання антрациту:

а – рядовий електрокальцинатор; *б* – електрокальцинатор з дросель-шайбою; 1 – нижній електрод; 2 – верхній електрод; 3 – вогнетривка футеровка; 4 – теплоізоляція; 5 – сталевая обичайка; 6 – бетонна пробка; 7 – газохід; 8 – живильник; 9 – водоохолоджуваний п'єдестал нижнього електрода; 10 – розвантажувальний стіл; 11 – розвантажувальний механізм; 12 – дросельовальний пристрій – дросель-шайба

Електропіч споряджається системою водяного охолодження п'єдесталу нижнього електрода та розвантажувального стола. Також можливе застосування водяного або примусового повітряного охолодження бічної поверхні електрокальцинатора. Для відведення летючих, що виділяються під час прожарювання антрациту або коксу застосовується система газовідведення. У нижній частині розміщується розвантажувальний стіл, концентрично до якого рухаються лопатки, що знімають з нього частину термообробленого матеріалу. Далі матеріал потрапляє до вагового дозатора. Існують два режими роботи розвантажувальної системи: перший – дискретний, встановлюється періодичність вивантаження, за якого лопатки обертаються з максимальною швидкістю поки не буде набрана задана величина дози, а в інший час вивантаження не відбувається; другий – безперервний, лопатки постійно обертаються з регульованою швидкістю, а дозатор реєструє кількість вивантаженого матеріалу. Швидкість руху сипучого матеріалу та продуктивність електрокальцинатора є змінними величинами і визначаються дозою та частотою його вивантаження або швидкістю обертання лопаток. Рівень матеріалу в електрокальцинаторі завжди підтримується постійним, завдяки системі подачі сировини.

Оброблюваний матеріал, рухається вниз вздовж вертикальної осі печі у порожнині, утвореній конструктивними елементами печі, а газу, які утворюються у процесі виділення залишкових летючих та часткового окиснення матеріалу, рухаються вгору.

Електричний струм безпосередньо проходить крізь оброблюваний матеріал та спричинює його нагрівання за рахунок виділення у ньому джоулевої теплоти. Термічне оброблювання вуглецевого матеріалу супроводжується фізичними процесами, які безпосередньо пов'язані між собою: складний рух сипучого матеріалу, спричинений дією сил гравітації та обертанням лопаток; протікання електричного струму крізь електропровідні елементи конструкції, включаючи сам матеріал; складний теплообмін усередині печі і зовні з оточуючим середовищем; рух газів у зворотному напрямку крізь шар сипучого матеріалу. Електричне поле в печі вважається безвихровим, термоелектричні ефекти не враховуються.

У процесі нагрівання сировини в електрокальцинаторі за температур нижчих за 1000 °C відбувається видалення вільної вологи і сорбованих речовин, коксування різних органічних сполук та розкладання нетривких неорганічних речовин (гідратів й карбонатів), тобто видалення летючих домішок. При цьому газу, що виділяються, вміщують передусім H_2O , H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , N_2 , вуглеводні і невелику кількість сірки.

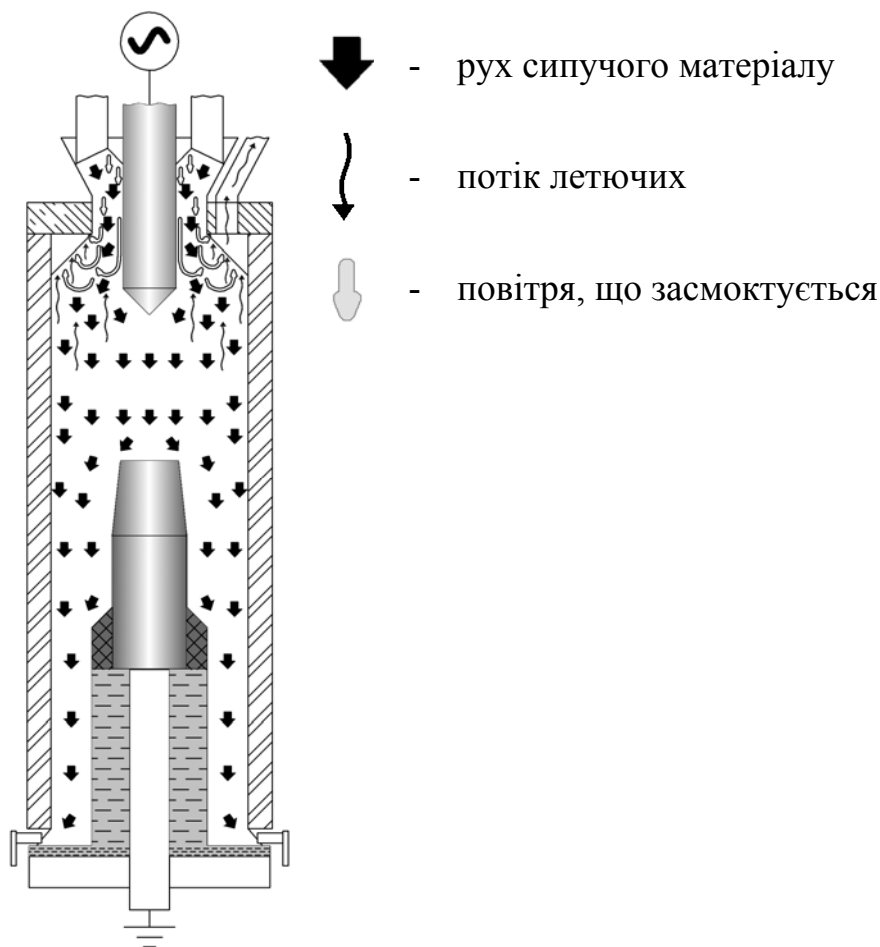


Рис. 2.2. Фізична модель електрокальцинатора

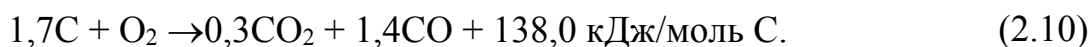
У промисловій практиці під час прожарювання антрациту застосовується підпалювання летких газів на (40–50) год після пуску електропечі. Продукти горіння видаляються крізь газохід завдяки розрідженню, що створюється димососом або димовою трубою. Внаслідок наявності тяги та підсмоктування повітря хімічний процес окиснення летючих газів та деякої частини сировини відбувається у порожнині під бетонною пробкою, верхньому об'ємі кальцинатора та по поверхні матеріалу.

Теплота, що виділяється під час горіння летючих газів, відіграє важливу роль у процесі термічного оброблення антрациту, підвищуючи температуру матеріалу, що надходить у зону прожарювання. Аналіз процесів горіння летючих газів та частково окиснення сировини в електрокальцинаторі ґрунтується на таких основних реакціях, що є аналогічними до процесів газифікації частинок твердого палива [91]:





У праці [67] наведені результати досліджень термодинамічних перетворень в антрациті під час його нагрівання на повітрі. Зазначається, що окиснення зразків антрациту починається за температури 669,3 °С, а найбільш висока швидкість реакції спостерігалася в інтервалі (780–785) °С. Сумарний тепловий ефект реакції становить 11,5 МДж/кг (138,0 кДж/моль С) у перерахунку на вуглець, що майже в три рази менше теоретичної теплотворної здатності вуглецевих матеріалів (33,9 МДж/кг (406,8 кДж/моль С)). Різниця в теплових ефектах пояснюється тим, що на початковій стадії окиснення вуглецю проходить за екзотермічною реакцією з утворенням CO_2 , а потім за ендотермічною реакцією $\text{C} + \text{CO}_2 \leftrightarrow 2\text{CO}$ [91]. Отриманому за даними калориметричних дослідів тепловому ефекту (138,0 кДж/моль С) відповідає балансова реакція



За даними літературних джерел [12, 13, 68], лабораторних досліджень та промислової практики прожарювання антрациту угар матеріалу в електрокальцинаторі складає біля (1–5) %.

Під час прожарювання зразка антрациту в аргоні встановлено, що виділення летючих починається за температури (80–100) °С і триває протягом усього температурного інтервалу до 1400 °С. Загальний процес виділення і розкладання летких речовин характеризується ендотермічним ефектом 1,15 МДж/кг антрациту (13,8 кДж/моль С), що становить близько 10 % від екзотермічного теплового ефекту під час окиснення зразка антрациту на повітрі.

Леткі гази, що виділяються при високотемпературному обробленні антрациту, мають наступний склад: CO_2 – (2–5) %, CO – (5–10) %, H_2 – (65–70) %, CH_4 – (1–2) %, N_2 – (15–20) %, H_2S – <1 % [67, 68]. Загальний тепловий ефект при їх окисненні складає 9,51 МДж/м³.

Внаслідок того, що термооброблюваний в електрокальцинаторі матеріал відноситься до сипучого середовища, при виконанні розрахунків значення його фізичних властивостей беруть ефективними та залежними від

температури. Фізичні властивості усіх матеріалів печі вважаються ізотропними.

Задачу теплоелектричного стану рухомого шару сипучого матеріалу в електричній печі можна розділити на декілька частин, що пов'язані між собою: перша – дискретний опис руху сипучого середовища, з використанням моделі МДЕ, друга – перехід від дискретної постановки до нерозривної, з одержанням поля швидкості, що описує рух матеріалу, третя – зв'язана електротермічна задача, що враховує динаміку сипучого середовища.

В основі МДЕ лежить баланс механічного руху частинки сипучого матеріалу у лагранжевій системі відліку [41]

$$\begin{cases} m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{d\tau} = m_i \mathbf{b} + \sum_{j=1}^k \mathbf{F}_{ij}; \\ I_i \frac{d\boldsymbol{\omega}_i}{d\tau} = \sum_{j=1}^k (\mathbf{T}_{ij} + \mathbf{M}_{ij}), \end{cases} \quad (2.11)$$

де m_i – маса, кг; τ – час, с; i – індекс частинки, відносно якої розглядається система рівнянь (2.11), \mathbf{v}_i – вектор лінійної швидкості центра маси частинки, м/с; I_i – момент інерції, кг·м²; $\boldsymbol{\omega}_i$ – вектор кутової швидкості, рад/с; \mathbf{b} – вектор масової сила, Н/кг; \mathbf{F}_{ij} – зовнішня сила, що діє на частинку i через контакт з частинкою j , Н; j – індекс частинки, що перебувають у контакті з частинкою i ; k – кількість частинок в контакті з частинкою i ; \mathbf{T}_{ij} – зовнішній крутний момент, пов'язаний з контактною взаємодією частинок i та j , Н·м; \mathbf{M}_{ij} – момент опору коченню, Н·м.

В МДЕ припускається, що кожна частинка є сферою радіусом R_i . Схематично взаємодія між частинками i та j представлена на рис. 2.3,а.

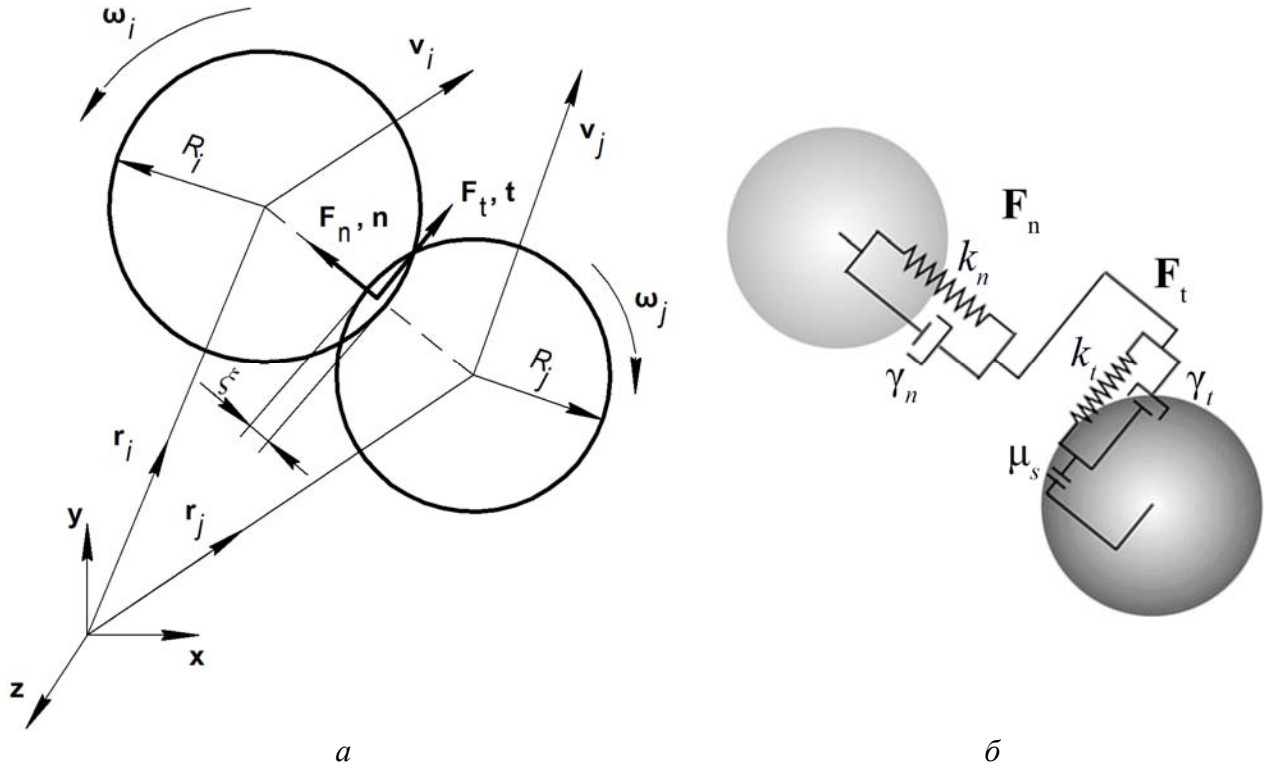


Рис. 2.3. Дві сферичні частинки i та j , що перебувають у контакті:

a – векторна схема контакту: $\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_j$ – вектор швидкості центра маси частинок;

$\boldsymbol{\omega}_i, \boldsymbol{\omega}_j$ – вектор кутової швидкості; $\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j$ – радіус-вектор; $\mathbf{r}_i = \{x, y, z\}$; $x, y, z \in \Omega_i$;

Ω_i – розрахункова область частинок; \mathbf{n} – одиничний нормальний вектор уздовж лінії, яка з'єднує центри частинок i та j ; ξ – нормальне перекриття частинок i та j ; b – схема в'язко-пружної взаємодії між частинками

Для опису контактної взаємодії між частинками в МДЕ можуть прийматися різні формулювання. Найбільш частіше зустрічається в'язко-пружна модель Hertz–Mindlin [69] (див рис. 2.3,б), яка припускає, що частинки при контакті не деформуються, а перекривають одна одну на величину ξ , утворюючи пляму контакту. Сумарна сила взаємодії між двома частинками розкладається на нормальну та тангенціальну складові $\mathbf{F}_{n,ij}$, $\mathbf{F}_{t,ij}$, відповідно, які визначаються таким чином [41, 61, 69–72]:

$$\mathbf{F}_{n,ij} = k_n \xi_n \mathbf{n} - \gamma_n \mathbf{v}_n, \quad (2.12)$$

$$\mathbf{F}_{t,ij} = -\min\{k_t \xi_t \mathbf{t} - \gamma_t \mathbf{v}_t; \mu_s \mathbf{F}_n\}, \quad (2.13)$$

де $k_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^* \xi_n}$ – коефіцієнт пружності при нормальній контактній взаємодії, Н/м; $E^* \rightarrow \left(\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_i^2}{E_i} + \frac{1-\nu_j^2}{E_j} \right)$ – ефективний модуль пружності, Па; E – модуль пружності при одноосному розтягненні/стисканні, Па; ν – коефіцієнт Пуассона; $R^* \rightarrow \left(\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j} \right)$ – приведений радіус частинок, м; $\xi_n = R_i + R_j - (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) \cdot \mathbf{n}$ – відносне нормальне перекриття частинок при контактній взаємодії, м; $\gamma_n = -2\sqrt{\frac{5}{3}} \beta \sqrt{E^* m^*} \sqrt[4]{R^* \xi_n} \geq 0$ – коефіцієнт демпфування в нормальному напрямі до поверхні контакту, кг/с; $\beta = \frac{\ln e_{ij}}{\sqrt{\ln^2 e_{ij} + \pi^2}}$ – безрозмірний коефіцієнт демпфування; e_{ij} – коефіцієнт реституції між матеріалами частинок i та j ; $m^* \rightarrow \left(\frac{1}{m^*} = \frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_j} \right)$ – приведена маса, кг; $\mathbf{v}_{ij} = \mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j + (R_i \boldsymbol{\omega}_i + R_j \boldsymbol{\omega}_j) \times \mathbf{n}$ – відносна швидкість в точці контакту частинок, м/с; $\mathbf{v}_n = (\mathbf{v}_{ij} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n}$ – нормальна складова \mathbf{v}_{ij} ; $\mathbf{v}_t = (\mathbf{n} \times \mathbf{v}_{ij}) \times \mathbf{n}$ – тангенціальна складова \mathbf{v}_{ij} ; μ_s – коефіцієнт тертя ковзання; $\xi_t = \int_{\tau_0}^{\tau} |(\mathbf{n} \times \mathbf{v}_{ij}) \times \mathbf{n}| d\tau$ – відносне тангенціальне перекриття частинок, що почалось в момент часу τ_0 і продовжується до даного моменту часу τ , м; $\mathbf{t} = \frac{\mathbf{v}_t}{|\mathbf{v}_t|}$ – одиничний тангенціальний вектор; $k_t = 8G^* \sqrt{R^* \xi_n}$ – коефіцієнт зсуву при контактній взаємодії, Н/м; $G^* \rightarrow \left[\frac{1}{G^*} = \frac{2(2+\nu_i)(1-\nu_i)}{E_i} + \frac{2(2+\nu_j)(1-\nu_j)}{E_j} \right]$ – ефективний модуль зсуву, Па; $\gamma_t = -4\sqrt{\frac{5}{3}} \beta \sqrt{G^* m^*} \sqrt[4]{R^* \xi_n} \geq 0$ – коефіцієнт демпфування у тангенціальному напрямі до контакту, кг/с.

Крутний момент, що діє на частинку, створюється тангенціальною силою $\mathbf{F}_{t,ij}$ та визначається рівнянням (2.14)

$$\mathbf{T}_{ij} = (R_i \mathbf{n}) \times \mathbf{F}_{t,ij}. \quad (2.14)$$

За відносного руху частинок також виникає момент опору коченню \mathbf{M}_{ij} [70, 71]

$$\mathbf{M}_{ij} = -\mu_r k_n \xi_n R^* \frac{\boldsymbol{\omega}_i}{|\boldsymbol{\omega}_i|}, \quad (2.15)$$

де μ_r – коефіцієнт тертя кочення.

За початкові умови беруть початкові координати та початкову швидкість усіх частинок системи:

$$\mathbf{r}_i|_{\tau=0} = \mathbf{r}_{i_0}, i = \overline{1, n}; \quad (2.16)$$

$$\mathbf{v}_i|_{\tau=0} = \mathbf{v}_{i_0}, i = \overline{1, n}, \quad (2.17)$$

де n – загальна кількість частинок у системі, \mathbf{r}_{i_0} – початковий радіус вектор для кожної частинки, м; \mathbf{v}_{i_0} – початковий вектор швидкості для кожної частинки, м/с.

Граничні умови (ГУ) для МДЕ при $\tau > 0$, описують взаємодію частинок з границями розрахункової області Ω_1 , рухомими та нерухомими стінками $G \in \Omega_1$ всередині області:

- частинка перебуває в контакті зі стінкою $g \in G$ геометрії, даний контакт розглядається аналогічно іншим контактам частинки, а сили взаємодії розраховуються з врахуванням того, що лінійна та кутова швидкості стінки є заданими:

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_g &= \text{const}; \\ \boldsymbol{\omega}_g &= \text{const}. \end{aligned} \quad (2.18)$$

- частинка i перебуває за межами розрахункової області. Вважається, що вона покидає систему та більше не бере участі в розрахунках

$$\mathbf{r}_i \notin \Omega_1 \rightarrow n-1. \quad (2.19)$$

Для розв'язання системи (2.11) необхідно визначити значення кроку інтегрування за часом. Ця величина має задовольняти умову (2.20) [73]

$$\Delta\tau \leq R^* \sqrt{\frac{8\rho\pi^3}{E^*}}, \quad (2.20)$$

Для розрахунків припустимим є значення $\Delta\tau = (10^{-5} - 10^{-6})$ с.

Рух частинок у розрахунковій області, що не змінюється та з постійними силами, що викликають цей рух, через деякий час можна вважати усталеним. Тому, якщо детальні часові варіації швидкості не є шуканими величинами, а важливий лише загальний усталений рух сипучого матеріалу, можливо використовувати осереднене поле швидкості, як характеристику руху сипучого середовища.

В МДЕ кожна частинка є фізичною точкою з постійними фізичними характеристиками, тобто із самої постановки впливає баланс маси системи. В результаті розв'язання дискретної задачі отримуємо траєкторії руху кожної окремої частинки в системі відліку Лагранжа. Тому для переходу до нерозривного опису середовища, необхідно отримати векторне поле швидкості у системі відліку Ейлера. Осереднення значень вектора швидкості потоку частинок за фізичним простором розрахункової області та за часом виконується за виразом (2.21)

$$\bar{\mathbf{v}}_i = \frac{1}{\Delta\tau} \int_{\tau_0}^{\tau_0+\Delta\tau} \frac{\sum_{j=1}^k w_{space,ij}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) w_{dens,ij}(V_{cell,i}, V_{gran,j}) \mathbf{v}_j^*}{\sum_{i=1}^k w_{space,ij}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) w_{dens,ij}(V_{cell,i}, V_{gran,j})} d\tau, \quad i = \overline{1, N}, \quad (2.21)$$

де $\bar{\mathbf{v}}_i$ – осереднене поле швидкості в ейлеревій системі відліку, м/с; $\Delta\tau$ – проміжок часу осереднення швидкості, с; τ_0 – початковий час осереднення, с; $w_{space,ij}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j)$ – просторова вагова функція, яка залежить від $\mathbf{r}_i \in \Omega_2$ – радіуса вектора точки осереднення та радіуса вектора $\mathbf{r}_j \in \Omega_1$ частинок, що перебувають в околі \mathbf{r}_i ; Ω_1 – розрахункова область дискретної моделі, що належить до лагранжевої системи відліку; Ω_2 – розрахункова область нерозривної моделі, що належить до ейлеревій системи відліку; $w_{dens,ij}(V_{cell,i}, V_{gran,j})$ – вагова функція, що враховує варіацію насипної густини частинок Ω_1 і залежить від об'єму ($V_{gran,j}$), які вміщуються в об'ємі розрахункової комірки ($V_{cell,i}$); $\mathbf{v}_j^* = (\mathbf{r}_j|_{\tau_0+\Delta\tau} - \mathbf{r}_j|_{\tau_0}) / \Delta\tau$ – швидкість частинок у лагранжевій системі відліку, у якій враховується їх поступальний та обертальний рух, м/с; k – кількість частинок, що перебувають в околі \mathbf{r}_i ; N – кількість розрахункових комірок, що утворюються в результаті дискретизації Ω_2 .

Одержане осереднене поле швидкості вважається результируючим і незмінним, тобто усталеним. Оскільки $\bar{\mathbf{V}}$ вже визначено, то в математичне формулювання задачі термоелектричного стану печі вже немає потреби включати рівняння нерозривності та збереження кількості руху для твердої фази (гранул).

Математичний опис електричного та теплового стану електропечі представлений зв'язаною системою диференціальних рівнянь теорії поля, яка включає: квазістаціонарне нелінійне рівняння безвихрового поля електричного потенціалу та нестационарне нелінійне неоднорідне рівняння теплопровідності з врахуванням конвективного переносу теплоти щільним рухомим шаром сипучого матеріалу, внутрішнього джерела теплоти (джоулевої) та джерела теплоти від хімічних реакцій взаємодії матеріалу з повітрям при високій температурі:

$$\begin{cases} \nabla \cdot [\sigma(T) \nabla u] = 0, \tau > 0; \\ c_p(T) \rho(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} + \nabla \cdot (T \bar{\mathbf{V}}) = \nabla \cdot [\lambda(T) \nabla T] + \sigma(T) |\nabla u|^2 + q_{vchem}, \tau > 0; \\ \mathbf{q} = -\lambda(T) \nabla T, \mathbf{j} = -\sigma(T) \nabla u, \end{cases} \quad (2.22)$$

де σ – ефективна питома електропровідність сипучого матеріалу, $(\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$; u – електричний потенціал, В; c_p – масова ізобарна теплоємність, Дж/(кг·К); ρ – густина, кг/м³; T – абсолютна температура, К; τ – час, с; λ – ефективна теплопровідність сипучого матеріалу, Вт/(м·К); \mathbf{q} – вектор густини теплового потоку, Вт/м²; \mathbf{j} – вектор густини електричного струму, А/м²; $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$ – оператор Гамільтона, м⁻¹; $X(x, y, z) \in \Omega_2$ – просторові координати, м; q_{vchem} – об'ємна густина джерела теплоти від хімічних реакцій взаємодії матеріалу з навколишнім середовищем при високій температурі, Вт/м³.

Густина внутрішнього джерела теплоти, що пов'язана з хімічними реакціями горіння летких газів та окиснення оброблюваного матеріалу, представлена у спрощеній ефективній формі та описується співвідношенням

$$q_{vchem} = \frac{q_{chem}(T) m_{chem}}{V_{chem} \Delta \tau_{chem}}, \quad (2.23)$$

де q_{chem} – сумарний тепловий ефект хімічних реакцій вуглецю та летючих, Дж/кг; m_{chem} – маса речовин, що приймають участь у хімічних

реакціях, кг; V_{chem} – об'єм зони, де проходять хімічні реакції, м³; $\Delta\tau_{chem}$ – тривалість хімічних процесів, с.

Для замкнення системи рівнянь (2.22) записуються відповідні початкові та граничні умови.

Початкові умови:

$$T|_{\tau=0} = T(x, y, z), \quad (2.24)$$

$$u|_{\tau=0} = u(x, y, z). \quad (2.25)$$

ГУ для рівняння теплопровідності (з індексом T) при $\tau > 0$:

- на границі контакту (Γ) з навколишнім середовищем задаються граничні умови III роду

$$\mathbf{n} \cdot (-\lambda(T) \nabla T)|_{\Gamma_T} = \alpha_{eff}(T - T_{\infty}), \quad (2.26)$$

- де \mathbf{n} – зовнішня нормаль до поверхні геометрії печі; α_{eff} – ефективний коефіцієнт тепловіддачі від поверхні печі до середовища, що враховує радіаційну складову теплообміну, Вт/(м·К); T_{∞} – температура навколишнього середовища, К.
- на осі симетрії задаються адіабатні умови

$$\mathbf{n} \cdot \nabla T|_{\Gamma_T} = 0. \quad (2.27)$$

ГУ для рівняння електричного потенціалу (з індексом E).

На верхньому торці верхнього електрода задається діюча електрична напруга

$$u|_{\Gamma_E} = u(\tau), \quad (2.28)$$

у випадку змінного однофазного струму

$$u(\tau) = u_d(\tau) \cos \varphi, \quad (2.29)$$

де u_d – діюче значення напруги, В; $\cos \varphi$ – враховує частку активної потужності у сумарній електричній потужності.

На нижньому торці нижнього електрода задається нульовий електричний потенціал

$$u|_{\Gamma_E} = 0, \quad (2.30)$$

а на решті поверхонь умови відсутності протікання електричного струму

$$\mathbf{n} \cdot \nabla u|_{\Gamma_E} = 0. \quad (2.31)$$

На границях контакту теплопровідних і електропровідних елементів конструкції печі розглядаються умови абсолютного теплового (2.32) та електричного (2.33) контактів, відповідно.

$$\begin{cases} \{T\} = 0; \\ \{\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}\} = 0; \end{cases} \quad (2.32)$$

$$\begin{cases} \{u\} = 0; \\ \{\mathbf{n} \cdot \mathbf{j}\} = 0, \end{cases} \quad (2.33)$$

де $\{T\} = T^+ - T^-$; $\{\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}\} = \mathbf{n}^- \cdot \mathbf{q}^+ + \mathbf{n}^+ \cdot \mathbf{q}^-$; $\{u\} = u^+ - u^-$; $\{\mathbf{n} \cdot \mathbf{j}\} = \mathbf{n}^- \cdot \mathbf{j}^+ + \mathbf{n}^+ \cdot \mathbf{j}^-$; для неелектропровідних елементів система рівнянь (2.33) не враховується.

2.2. Методика числового розв'язання

Методика числового розв'язання системи рівнянь (2.11)–(2.19) МДЕ ґрунтується на числовому інтегруванні рівняння руху матеріальної точки. У загальному випадку похідні за часом у системі рівнянь (2.11) замінюються на скінченні різниці, і таким чином неперервний час дискретизується на скінчену кількість кроків – $\Delta\tau$. Використовуючи початкові координати матеріальної точки та деякі їх похідні за часом (залежно від алгоритму) в момент τ , можна розрахувати ці ж величини в момент $\tau + \Delta\tau$. При повторюванні цієї процедури, отримаємо траєкторію руху матеріальної точки.

Відомі різноманітні методи інтегрування рівняння руху матеріальної точки. Найбільш поширеними є алгоритми: Ейлера, Верле (Verlet), «Leapfrog», Beeman's, Верле з використанням швидкості (Velocity Verlet). Використання метода Velocity Verlet для МДЕ є найбільш доцільним [61].

Інтегруючи перше рівняння системи (2.11), приймемо, що $\mathbf{r}_i^\tau, \mathbf{v}_i^\tau, \mathbf{a}_i^\tau$ – відомі значення, відповідно, радіус вектора, швидкості та прискорення частинки

i в початковий момент часу τ , \mathbf{F}_i – сумарна сила, що діє на частинку, m_i – маса частинки i .

Тоді послідовно інтегруючи перше рівняння системи (2.1), знайдемо шукані значення $\mathbf{r}_i^{\tau+\Delta\tau}$, $\mathbf{v}_i^{\tau+\Delta\tau}$, $\mathbf{a}_i^{\tau+\Delta\tau}$ на наступному часовому кроці $\tau + \Delta\tau$

$$\mathbf{r}_i^{\tau+\Delta\tau} = \mathbf{r}_i^{\tau} + \mathbf{v}_i^{\tau}\Delta\tau + \frac{1}{2}\mathbf{a}_i^{\tau}(\Delta\tau)^2, \quad (2.34)$$

$$\mathbf{v}_i^{\tau+\frac{\Delta\tau}{2}} = \mathbf{v}_i^{\tau} + \frac{1}{2}\mathbf{a}_i^{\tau}\Delta\tau, \quad (2.35)$$

$$\mathbf{a}_i^{\tau+\Delta\tau} = \frac{\mathbf{F}_i}{m_i}, \quad (2.36)$$

$$\mathbf{v}_i^{\tau+\Delta\tau} = \mathbf{v}_i^{\tau+\frac{\Delta\tau}{2}} + \mathbf{a}_i^{\tau+\Delta\tau} \frac{\Delta\tau}{2}. \quad (2.37)$$

Аналогічно розв'язується друге рівняння системи (2.11) для кутової швидкості i -ї частинки $\boldsymbol{\omega}_i$.

Методика числового розв'язання сформульованої задачі теплоелектричного стану (2.22)–(2.33) базується на методі скінченних об'ємів [74–76, 92].

Метод МСО ґрунтується на інтегральній формі рівнянь збереження. Балансові співвідношення фізичних величин записуються для кожного контрольного об'єму (розрахункової комірки), на які попередньо розбивається розрахункова область. Розрахункові комірки не перетинаються та повністю заповнюють область розрахунку. Цей метод не прив'язаний до якогось конкретного типу комірок, тому на практиці найчастіше використовують неструктуровані тетраедральні, гексагедральні та інші багатогранні сітки.

Система диференціальних рівнянь вихідної задачі дискретизується та трансформується у систему лінійних алгебричних рівнянь (СЛАР) виду

$$[\mathbf{A}]\mathbf{x} = \mathbf{b}, \quad (2.38)$$

де $[\mathbf{A}]$ – матриця СЛАР; \mathbf{x} – вектор невідомих величин; \mathbf{b} – вектор вільних членів.

Кожний член інтегральної форми диференціального рівняння розглядається окремо, а інтегрування по об'єму, використовуючи теорему Гауса, замінюються інтегруванням по замкненій поверхні S комірки

$$\int_V \nabla \bullet \phi dV = \int_S d\mathbf{S} \bullet \phi, \quad (2.39)$$

де ϕ – представляє будь-яке тензорне поле; \bullet – будь-який тензорний оператор; \mathbf{S} – вектор, що дорівнює площі грані комірки, m^2 .

Розглянемо основні диференціальні оператори рівнянь збереження та їх лінеаризацію.

Оператор Гамільтона або градієнта записується таким чином

$$\int_V \nabla \phi dV = \int_S d\mathbf{S} \phi = \sum_f \mathbf{S}_f \phi_f, \quad (2.40)$$

де f – кількість граней скінченного об'єму; \mathbf{S}_f – вектор, що дорівнює площі грані комірки; ϕ_f – значення функції ϕ у центрі грані комірки.

Наведена в рівнянні (2.40) лінеаризація градієнта, представляє собою найпростішу схему інтегрування Гауса. Також часто використовують більш точну схему – метод найменших квадратів виду

$$\nabla \phi = \sum_N \omega_N^2 \mathbf{G}^{-1} \cdot \mathbf{d}(\phi_N - \phi_P), \quad (2.41)$$

де $\mathbf{G} = \sum_N \omega_N^2 \mathbf{d}\mathbf{d}$; $\omega_N = \frac{1}{|\mathbf{d}|}$; ϕ_N – значення функції ϕ у центрі сусідньої комірки; ϕ_P – шукане значення функції ϕ у центрі розрахункової комірки; \mathbf{d} – вектор між центрами розрахункової та сусідньої комірок.

Оператор Лапласа, що інтегрується по контрольному об'єму набуває вигляду

$$\int_V \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) dV = \int_S d\mathbf{S} \cdot (\Gamma \nabla \phi) = \sum_f \Gamma_f \mathbf{S}_f \cdot (\nabla \phi)_f, \quad (2.42)$$

де Γ – фізична властивість середовища; $\mathbf{S}_f \cdot (\nabla \phi)_f = |\mathbf{S}_f| \frac{\phi_N - \phi_P}{|\mathbf{d}|}$.

Коли вектор \mathbf{d} не є паралельним вектору \mathbf{S}_f , до виразу (2.42) додаються коригувальні члени.

Конвективний член системи рівнянь лінеаризується таким чином

$$\int_V \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \phi) dV = \int_S d\mathbf{S} \cdot (\rho \mathbf{V} \phi) = \sum_f \mathbf{S}_f \cdot (\rho \mathbf{V})_f \phi_f, \quad (2.43)$$

де \mathbf{V} – вектор швидкості, м/с.

Значення функції ϕ у центрі грані комірки можна визначити різними методами інтерполяції дискретних функцій. Найбільшого розповсюдження набули: метод центральних різниць (Central Differencing), схема з різницями проти потоку (Upwind Differencing), гібридна схема (Blended Differencing), нелінійні схеми (MUSCL, QUICK) та ін.

Для нестационарних задач дискретизоване за часом довільне балансове рівняння записується таким чином

$$\int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \left[\frac{\partial}{\partial\tau} \int_V \rho \phi dV + \int_V \Psi \phi dV \right] d\tau = 0, \quad (2.44)$$

де Ψ – будь-який диференціальний оператор (наприклад, оператор Лапласа).

Перший доданок рівняння (2.44) може бути записаний за допомогою явного методу Ейлера

$$\int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \left[\frac{\partial}{\partial\tau} \int_V \rho \phi dV \right] d\tau = \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \frac{(\rho_P \phi_P V)^{\tau+\Delta\tau} - (\rho_P \phi_P V)^{\tau}}{\Delta\tau} d\tau = \frac{(\rho_P \phi_P V)^{\tau+\Delta\tau} - (\rho_P \phi_P V)^{\tau}}{\Delta\tau} \Delta\tau, \quad (2.45)$$

а другий доданок рівняння (2.44) прийме вигляд

$$\int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \left[\int_V \Psi \phi dV \right] d\tau = \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \Psi^* \phi d\tau, \quad (2.46)$$

де $\Psi^* \phi$ – лінеаризований диференціальний оператор.

Для диференціального оператора (2.46) можливі такі способи опису інтегрування за часом:

– явний метод Ейлера

$$\int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \Psi^* \phi d\tau = \Psi^* \phi^{\tau} \Delta\tau; \quad (2.47)$$

– неявний метод

$$\int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \Psi^* \phi d\tau = \Psi^* \phi^{\tau+\Delta\tau} \Delta\tau; \quad (2.48)$$

– метод Кранка-Ніколсона

$$\int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \Psi^* \phi d\tau = \Psi^* \left(\frac{\phi^{\tau+\Delta\tau} + \phi^{\tau}}{2} \right) \Delta\tau. \quad (2.49)$$

Граничні умови, які необхідні для однозначності формулювання задачі, задаються на граничних гранях комірок розрахункової області.

Граничні умови Дирихле (коли задається значення дискретної функції ϕ_b на граничних гранях комірки) формулюються таким чином:

- коли потрібно лише значення дискретної функції ϕ_f , то ϕ_f замінюється на ϕ_b ;
- коли потрібно значення градієнта $(\nabla\phi)_f$, то градієнт розраховується за формулою

$$\mathbf{S}_f \cdot (\nabla\phi)_f = |\mathbf{S}_f| \frac{\phi_b - \phi_P}{|\mathbf{d}|}. \quad (2.50)$$

Граничні умови Неймана (коли задається значення градієнта g_b в нормальному напрямку до граничної грані комірки) записуються таким чином:

- коли потрібно лише значення дискретної функції ϕ_f

$$\phi_f = \phi_P + \mathbf{d} \cdot (\nabla\phi)_f = \phi_P + |\mathbf{d}| g_b; \quad (2.51)$$

- коли потрібно значення градієнта $(\nabla\phi)_f$

$$\mathbf{S}_f \cdot (\nabla\phi)_f = |\mathbf{S}_f| g_b. \quad (2.52)$$

Підсумовуючи дискретизовані та лінеаризовані диференціальні оператори, які входять у рівняння, наприклад, енергії або електричного потенціалу системи рівнянь (2.22), отримуємо СЛАР. Кількість рівнянь у системі та кількість невідомих дорівнюють кількості контрольних об'ємів у розрахунковій системі. Подібні системи можуть розв'язуватися різноманітними методами, серед найбільш використовуваних є: метод Якобі, метод Гауса-Зейделя, група релаксаційних методів (GS, DIC/DILU), група

проекційних методів (CG/BiCG, BiCGStab, GMRES), методи Geometric Multigrid (GAMG), методи Algebraic Multigrid (AMG) та ін.

2.3. Методика числового розв'язання нелінійної теплоелектричної задачі за заданої електричної потужності системи

Розв'язання зв'язаної теплоелектричної задачі нестационарного нагрівання є складною проблемою математичної фізики. Крім того, якщо розрахункова система включає об'єкти з температурною залежністю фізичних властивостей (теплопровідність, питома електропровідність), то задача ускладнюється ще більше.

Сипучі вуглецеві матеріали, що оброблюються в електрокальцинаторі, мають значно нелінійні теплофізичні властивості. Питома електропровідність та теплопровідність збільшується зі зростанням температури. Якщо врахувати, що основне джерело теплоти в електричній печі є Джоулева теплота, яка прямує залежить від питомої електропровідності матеріалів, то при високотемпературному оброблюванні сипучих речовин виникає явище каналізації електричного струму. Розподіл густини електричного струму в об'ємі печі стає значно нерівномірним, з вираженням локальним максимумом.

Дане явище спостерігається як у технологічних процесах термообробки вуглецевих матеріалів, так і в числовій моделі цих процесів. У результаті має місце значна розбіжність у значеннях діючої електричної потужності між моделлю та експериментальними даними. Для усунення цієї проблеми розроблено методику числового розв'язання нелінійної теплоелектричної задачі при заданій електричній потужності системи.

В основу числової методики покладено те, що діюча в печі електрична потужність слугує заданою умовою при розв'язанні системи рівнянь (2.22). Цю методику можна описати наступними чотирма пунктами.

1. Для даного часу та температурного поля, а також значень фізичних властивостей системи розв'язується стаціонарне рівняння електричного потенціалу

$$\nabla \cdot [\sigma(T) \nabla u] = 0, \quad (2.53)$$

за граничних умов (2.28) і (2.29), для поверхні підводу електричного струму

$$u|_{\Gamma_E} = u_{bc}^*, \quad (2.54)$$

де u_{bc}^* – постійна ефективна напруга.

2. Визначення діючої електричної потужності

$$P^* = \int_V \sigma(T) |\nabla u|^2 dV, \quad (2.55)$$

де V – об'єм розрахункової області;
та коефіцієнта потужності – k_p , що характеризує співвідношення між отриманим та заданим значеннями

$$k_p = \frac{P_{\text{зад}}}{P^*}, \quad (2.56)$$

де $P_{\text{зад}}$ – задане значення електричної потужності в системі.

3. Корегування поля об'ємної густини джерела Джоулевої теплоти, Вт/м³

$$q_{vE} = k_p \sigma(T) |\nabla u|^2. \quad (2.57)$$

4. Розв'язання нестационарного рівняння теплопровідності для даного часового кроку з врахуванням корегованого поля q_{vE}

$$c_p(T) \rho(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} + \nabla \cdot (T \bar{V}) = \nabla \cdot [\lambda(T) \nabla T] + q_{vE} + q_{v\text{chem}}. \quad (2.58)$$

Метод можна використовувати за малих кроків за часом, коли зміна теплофізичних властивостей за один часовий крок є незначною і нею можна знехтувати. Значення часового кроку визначається методом подвійного перерахунку [76].

Дана методика використовує діючу електричну потужність як основний задавальний параметр роботи електропечі і дає можливість розробляти раціональні регламенти її експлуатації, а також коректно порівнювати експериментальні та розрахункові дані.

2.4. Програмне забезпечення

Наразі існує безліч програмних продуктів для проведення числового моделювання. Деякі з них є вузькоспеціалізованими, тобто спрямованими на розв'язання певного класу задач, а деякі являють собою комплекси різних інструментів для вирішення широкого кола проблем в одному робочому середовищі. Серед найбільш відомих програмних продуктів варто відмітити такі: для задач гідро-газодинаміки та механіки суцільного середовища – ANSYS, ANSYS FLUENT, ANSYS CFX, STAR-CD, FLOWVISION, COMSOL Multiphysics, ELMER, OpenCFD; для задач моделювання поведінки сипучих середовищ – LAMMPS, PFC(2D & 3D), EDEM, LS-DYNA, MFIX, Yade.

Більшість з них є комерційними продуктами із закритим кодом, які поширюються під власними ліцензіями, що тягне за собою низку переваг і недоліків. Але при цьому існують деякі проекти, які працюють на умовах вільного програмного забезпечення, з відкритим програмним кодом. Прикладом такого проекту є OpenFOAM [77] (задачі мультифізики) та LIGGGHTS [78] (задачі фізики сипучих середовищ з використанням МДЕ).

OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation) – вільно розповсюджуваний, відкритий програмний код, що є широким набором інструментів для розв’язання задач обчислювальної гідродинаміки. Поширюється згідно з ліцензією GNU General Public License (GPL) (Універсальна громадська ліцензія GNU), яка гарантує, що в користувача є свобода використовувати, копіювати, поширювати, вивчати, змінювати і покращувати програмне забезпечення. За допомогою цього продукту можна розв’язувати задачі гідро- та аеродинаміки нестисливого і стисливого середовищ з використанням різних моделей турбулентності (RANS, LES, DES, DNS); багатофазні задачі з урахуванням хімічних реакцій і тепло- та масообміну; задачі горіння рідин, газів і твердих частинок; розрахунки на міцність і динаміки твердих тіл; електричні та магнетизму; фінансового моделювання. Також є багато додаткових інструментів для роботи з геометрією, створення розрахункової сітки, підготовки до обчислень і обробки отриманих результатів. При цьому всі задачі можуть розв’язуватися із застосуванням паралельних обчислень. OpenFOAM має відкритий програмний код, написаний на мові C++ і дозволяє користувачу вносити власні зміни та доповнення. При цьому код реалізований так, що більшість диференціальних та тензорних операторів можуть бути представлені у зрозумілій формі.

LIGGGHTS (LAMMPS Improved for General Granular and Granular Heat Transfer Simulations) – є модифікованою версією вільного відкритого коду LAMMPS [79] (задачі молекулярної динаміки), що використовує МДЕ для моделювання статичної та динамічної сипучих середовищ. Код дає змогу використовувати паралельні обчислення, тому може застосовуватися для великих задач з більш ніж 10^7 окремих частинок. Основні особливості LIGGGHTS: різні моделі контактної взаємодії між частинками, ефективні алгоритми МДЕ, моделювання частинок вільної форми, моделювання теплопередачі у сипучому середовищі, імпортування в модель рухомих та нерухомих геометричних об’єктів, зв’язана задача взаємодії частинок з суцільним середовищем, з використанням OpenFOAM.

Використання вільного відкритого програмного забезпечення є безумовно актуальним та фінансово привабливим для сучасної наукової

роботи, тому для розв'язання сформульованої у роботі задачі (див. підрозділ 2.1), обрані саме ці програмні коди.

2.5. Розробка числових моделей фізичних полів високотемпературного оброблення рухомого шару сипучих матеріалів у електрокальцинаторі

У монографії на підставі розроблених математичних моделей, описаних методик числового розв'язання сформульованих задач і сучасного CAD-CAE ПЗ розроблено числові моделі динаміки сипучого матеріалу та термоелектричного стану електрокальцинаторів різних конструкцій, які дають можливість отримувати дані з фізичних полів та важливі параметри роботи агрегатів на різних матеріалах, що термічно оброблюються, регламентах введення електричної потужності, конструкційних і технологічних параметрах тощо, що є необхідним для вдосконалення діючих і створення нових (або модернізованих) технологічних регламентів та обладнання.

Для розв'язання поставленої задачі розроблено числові моделі електрокальцинаторів різних конструкцій (рис. 2.4, 2.5). Розробка числових моделей проводилася на основі математичного формулювання задачі (див. підрозд. 2.1) та методики числового розв'язання (див. підрозд. 2.2).

За початкові та граничні умови приймалися (2.16)–(2.19), (2.24)–(2.33). Для задачі руху сипучого середовища ГУ є взаємодія частинок системи з розрахунковою областю та геометричними об'єктами, які є конструктивними елементами печі (корпус печі, завантажувальний резервуар, розвантажувальний стіл, обертові лопатки, та ін.). Для задачі теплоелектричного стану ГУ задаються: на границі верхнього та нижнього електродів – перепад електричного потенціалу та активна діюча потужність печі; умови теплової взаємодії граничних областей печі та навколишнього середовища описуються граничними умовами Робена та Неймана з використанням ефективних коефіцієнтів тепловіддачі; на границях контакту твердих елементів конструкції печі приймається абсолютний контакт. Також враховується розподіл об'ємного джерела теплоти хімічної взаємодії.

Теплофізичні властивості матеріалів футеровки електрокальцинатора та сировини приймалися відповідно до [80–82] та за даними проведених експериментальних досліджень [29, 83] (Додаток Е).

Ефективні значення коефіцієнтів тепловіддачі від зовнішніх поверхонь електричної печі до навколишнього середовища визначалися на підставі проведених експериментальних досліджень і літературних даних [83, 84].

Для моделювання переміщення матеріалу застосовується дискретна постановка МДЕ (2.11)–(2.19). Розглядається рух еквівалентних за розміром гранул у просторі печі, який створюється обертанням лопаток

(рис. 2.3,а, 2.4,а). Одержані переміщення кожної гранули дали можливість, використовуючи методику осереднення (2.21), отримати усереднене безрозмірне поле швидкості, що використовується при моделюванні електричних і температурних полів в електрокальцинаторі.

Числові моделі теплоелектричного стану електрокальцинатора представляють собою плоску вісесиметричну геометрію (рис. 2.3,б, 2.4,б). Дискретизовані моделі наведені на рис. 2.3,в та 2.4,в.

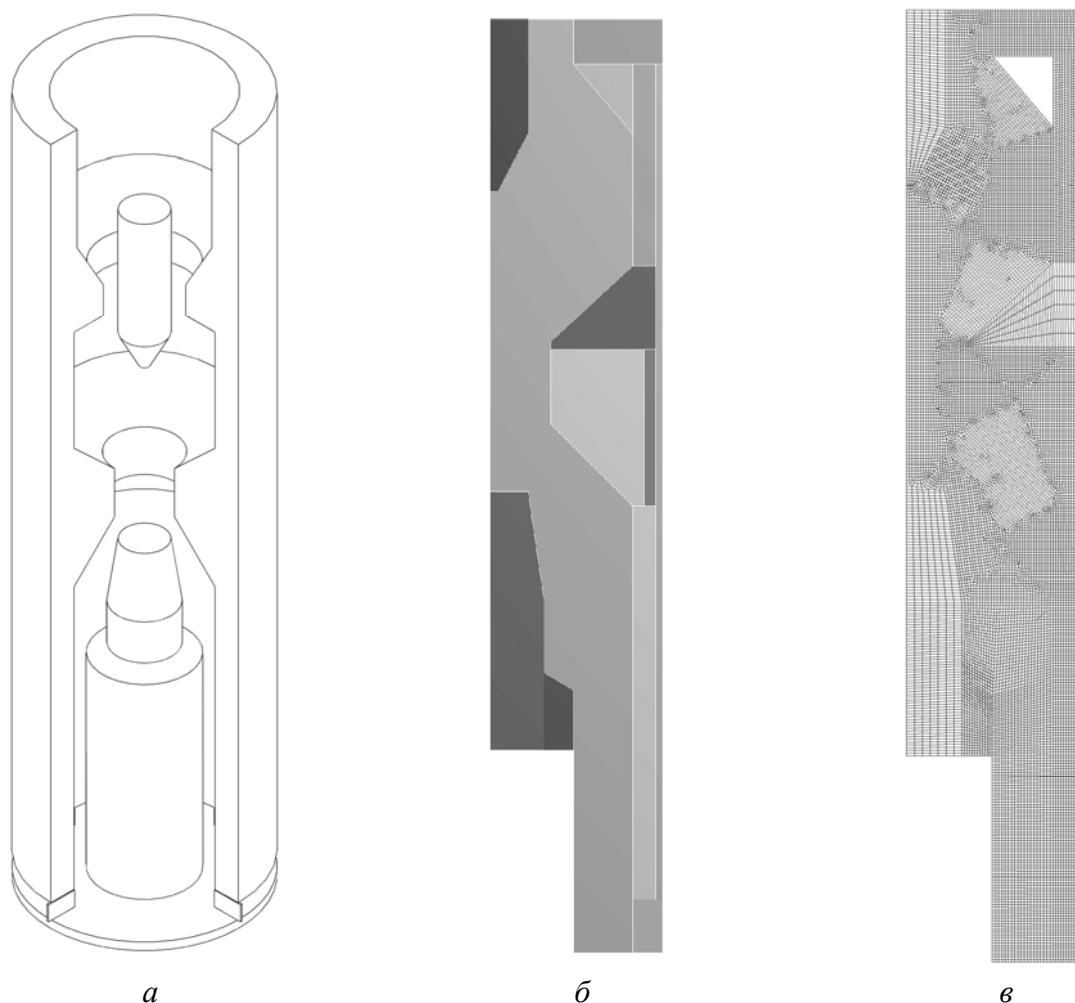


Рис. 2.4. Геометричні характеристики та дискретизація числової моделі для розрахунків динаміки сипучого матеріалу та фізичних полів електрокальцинаторі № 1:
 а – геометрична модель стінок електрокальцинатора для прогнозування руху гранул;
 б – плоска вісесиметрична геометрична модель електрокальцинатора; в – дискретизована модель електрокальцинатора ($N_{\text{ком}} = 18236$, $N_{\text{вузл}} = 36984$)

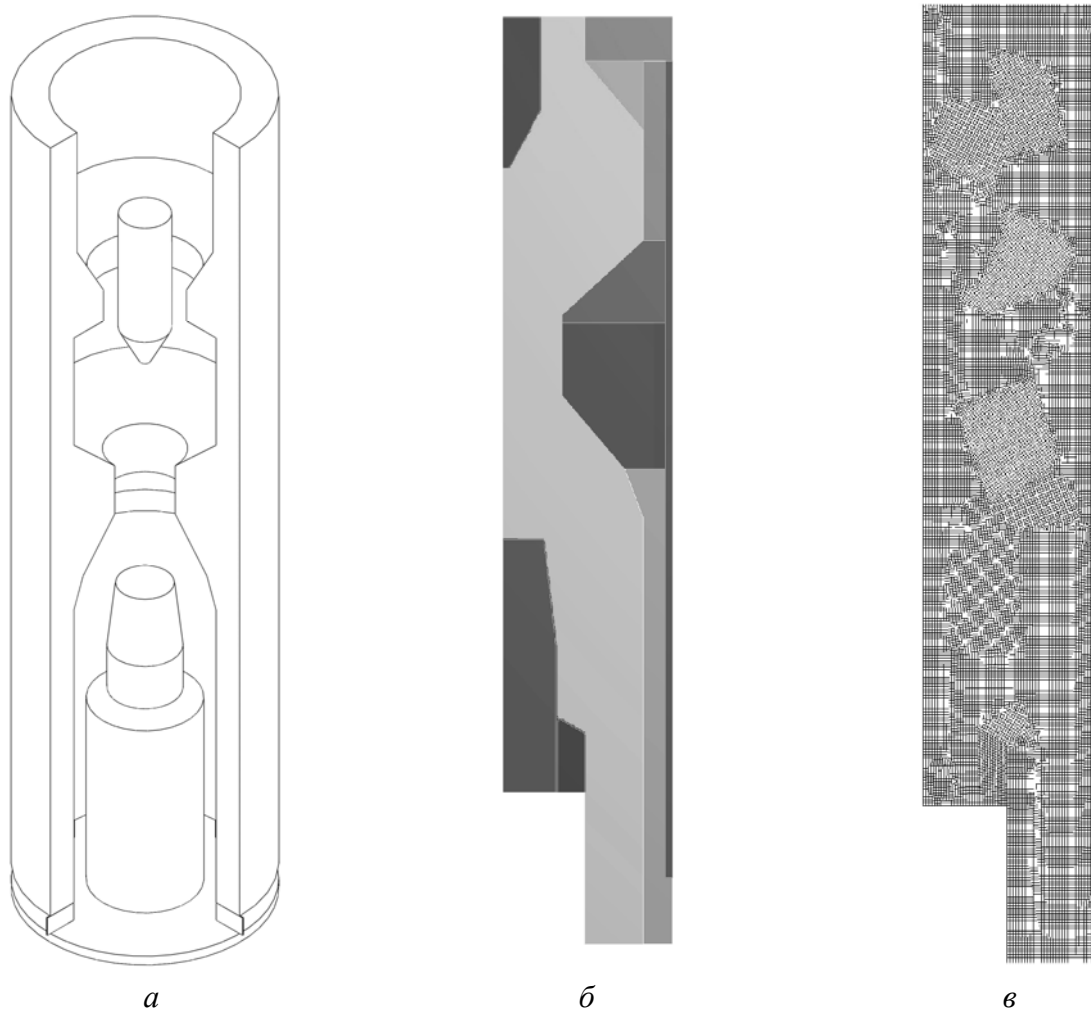


Рис. 2.5. Геометричні характеристики та дискретизація числової моделі для розрахунків динаміки сипучого матеріалу та фізичних полів електрокальцинаторі № 2:
a – геометрична модель стінок електрокальцинатора для прогнозування руху гранул;
б – плоска вісесиметрична геометрична модель електрокальцинатора; *в* – дискретизована модель електрокальцинатора ($N_{\text{ком}} = 19353$, $N_{\text{вузл}} = 39197$)

3. АПРОБАЦІЯ І ВЕРИФІКАЦІЯ ЧИСЛОВОЇ МОДЕЛІ СТАТИКИ ТА ДИНАМІКИ СИПУЧИХ МАТЕРІАЛІВ НА ДАНИХ ТОЧНИХ РОЗВ'ЯЗКІВ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

3.1. Верифікація математичної моделі статички та динаміки сипучих матеріалів

3.1.1. Формування кута природного укусу методами натурного та числових експериментів

Формування кута природного укусу – одна з характерних властивостей сипучих матеріалів (див. розд. 1). На практиці значення КПУ використовується як найбільш простий і зручний, з погляду вимірювання, параметр, що може характеризувати поведінку порошків та сипучих матеріалів. Величина КПУ залежить від багатьох чинників, зокрема від сил тертя, що виникають під час руху частинок матеріалу відносно одна одної, сил зчеплення між ними, розміру і форми окремих гранул, гранулометричного складу, поверхні на якій формується гірка тощо.

У праці [47] зазначено, що формування КПУ для його подальшого вимірювання може бути проведено різними способами. Відзначаються найбільш поширені: висипання матеріалу з воронки на горизонтальну поверхню або на циліндричну підставку; спорожнення прямокутного короба з плоским дном; ковзання гранул по похилій поверхні; перемішування сипучого матеріалу у горизонтальному обертовому барабані. Також у цій статті звертається увага на те, що вимірювання КПУ, часто дають різні результати, тому рекомендують разом із отриманими даними приводити опис методики вимірювання.

У праці [46] наводяться дані про способи вимірювання різних властивостей сипучих середовищ, у тому числі і КПУ. Описується метод вимірювання КПУ, який дає змогу враховувати неправильну конічну форму гірки матеріалу. Порожній циліндр встановлюється на круглій підставці, внутрішній діаметр циліндра і діаметр основи є еквівалентними. Після заповнення циліндра матеріалом його піднімають з постійною швидкістю 5 мм/с, після чого частинки утворюють гірку на круглій основі. Отриманий стан фотографується з восьми сторін, при повороті основи на $22,5^\circ$. За такого підходу може бути врахована складна, неконічна форма гірки матеріалу. Отримані знімки обробляються спеціалізованим програмним забезпеченням, яке дозволяє визначити плоску проекцію геометричної форми гірки. Результатом вимірювань КПУ буде кут при основі рівнобедреного

трикутника, площа якого еквівалентна площі проекції гірки сипучого матеріалу.

Для апробації МДЕ проведено низку натурних вимірювань КПУ. Як сипучий матеріал у дослідженнях використовувався нафтовий кокс з істинною густиною 2120 кг/м^3 і гранулометричним складом (1–13) мм. Схему проведення експериментальних досліджень наведено на рис. 3.1.

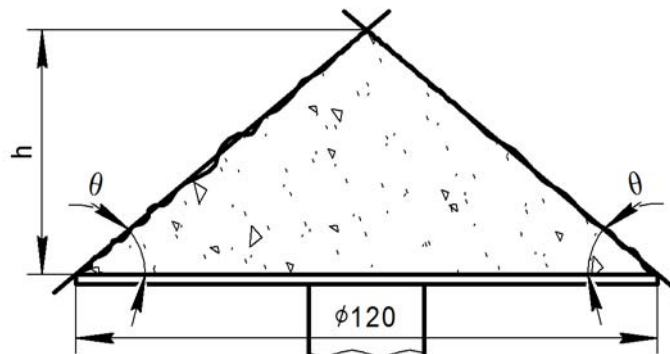


Рис. 3.1. Схема проведення вимірів КПУ

На нерухому пластину круглої форми $\varnothing 120 \text{ мм}$ встановлювався порожній циліндр $\varnothing 100 \text{ мм}$ і висотою 100 мм , який повністю заповнювався сипучим матеріалом. Далі циліндр різко піднімався, даючи матеріалу можливість вільно осипатися і формувати гірку. Отриманий стан фотографувався, а цифрові знімки оброблялися на комп'ютері.

Схематичний алгоритм обробки зображень для визначення координат вільної поверхні між сипучим середовищем і повітрям наведено на рис. 3.2.

Цифрові знімки приводилися до одного масштабу та одній загальній системі координат, потім конвертувалися у чорно-біле бінарне зображення. Далі використовувалися алгоритми обробки цифрових рисунків, який дозволяє знайти координати точок на границі контакту білої і чорної областей, що приймалася за границю сипучий матеріал/повітря. Враховуючи відношення розміру гранул до діаметра основи та не відтворюваність висоти та форми вершини гірки матеріалу (в процесі вимірів спостерігалися такі форми вершини: гостра, скруглена, плоска), що пов'язано із зовнішніми чинниками та властивостями сипучих матеріалів, як результуючі дані приймалися координати точок, що перебувають вище $0,1h_{\text{гірки}}$ та нижче $0,9h_{\text{гірки}}$, де $h_{\text{гірки}}$ – висота гірки матеріалу. КПУ визначався, як арктангенс коефіцієнта при аргументі рівняння лінійної регресії за числовими даними, отриманими із цифрових знімків. Результати оброблених цифрових зображень наведено на рис. 3.2.

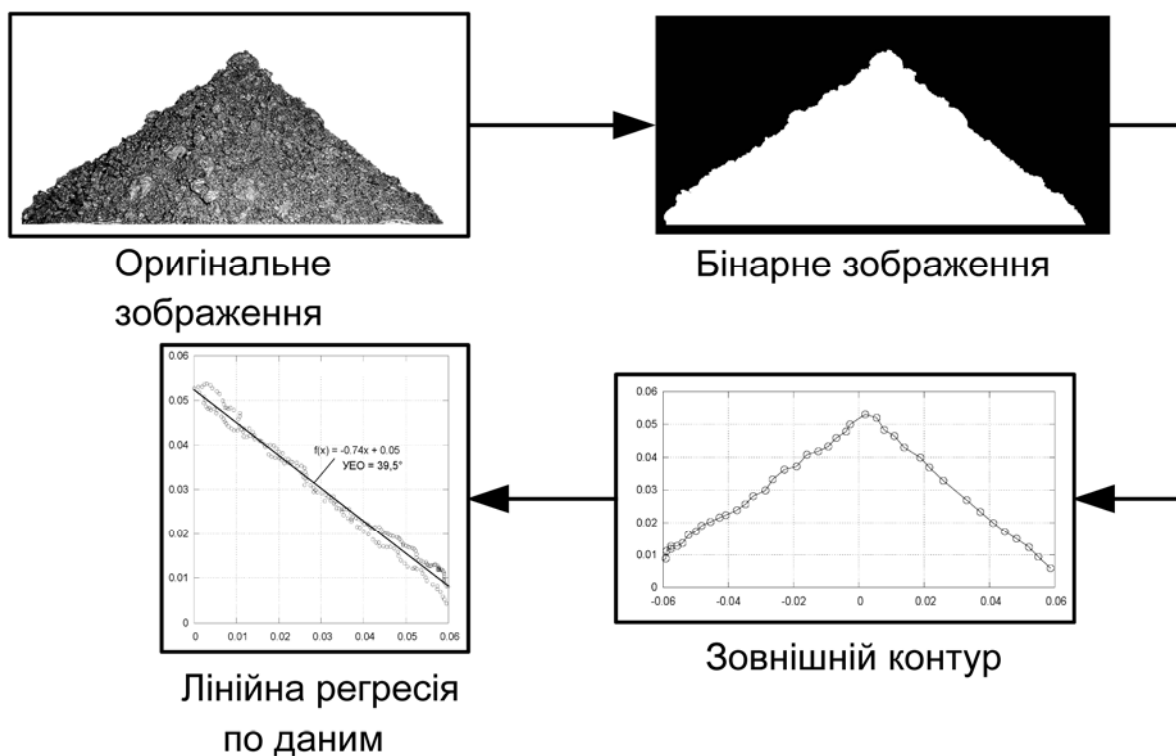


Рис. 3.2. Схематичний алгоритм обробки цифрових зображень та вимірювання КПУ

Результати розрахунків КПУ за проведеної серією натурних вимірювань показали, що значення КПУ для нафтового коксу фракційним складом (1–13) мм, при його вимірюванні описаним вище способом, становить $(38,9 \pm 1,9)^\circ$.

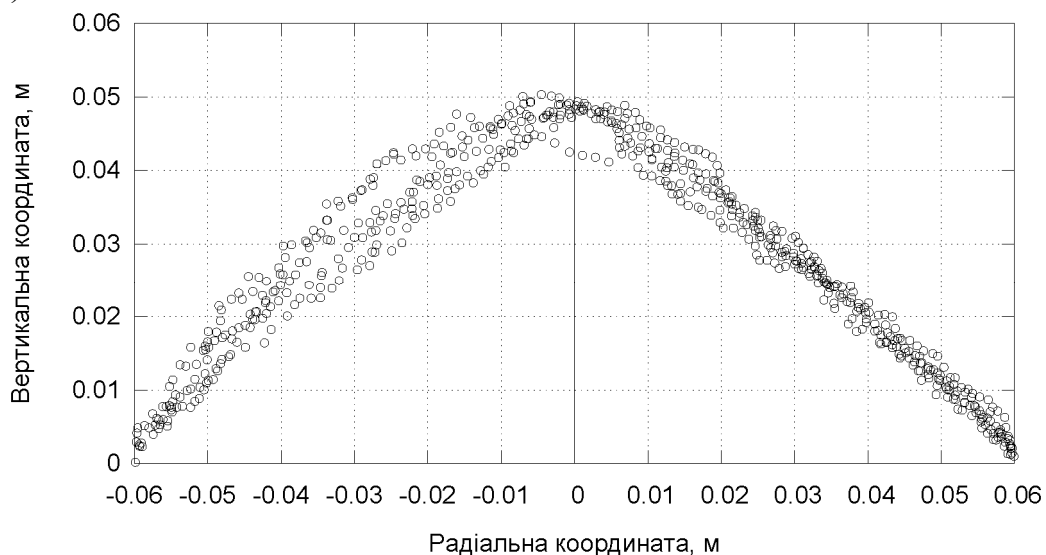


Рис. 3.3. Результати обробки цифрових зображень гірки сипучого матеріалу

Для налаштування та верифікації числової моделі для розрахунків статички сипучих матеріалів, проведені натурні експерименти з визначення КПУ, були відтворені за допомогою МДЕ [96–99]. При цьому початкові умови представляли собою гранули, вільно упаковані під дією сил гравітації, висотою 100 мм в об'ємі, що обмежений з боків циліндричною стінкою $\varnothing 100$ мм, а знизу – горизонтальною круглою пластиною $\varnothing 120$ мм. Фізичні властивості сипучого матеріалу, який використаного для числового аналізу за допомогою МДЕ, наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Фізичні властивості сипучого матеріалу при розрахунках МДЕ

Параметр	Значення
Істинна густина, кг/м^3	2120
Ефективний модуль пружності при одноосному розтягненні/стисканні, МПа	$5,0 \cdot 10^6$
Ефективний коефіцієнт Пуассона	0,3
Коефіцієнт реституції	0,1
Діаметр частинок, мм	1–13
Кількість частинок	262560

У початковий момент часу система мала нульову швидкість. Вільний рух частинок починався після усунення циліндричної стінки. Після припинення руху, частинки утворювали гірку з кутом природного укосу. Фізичний час розрахунку складав 2 с. Процес формування гірки сипучого матеріалу представлений на рис. 3.4.

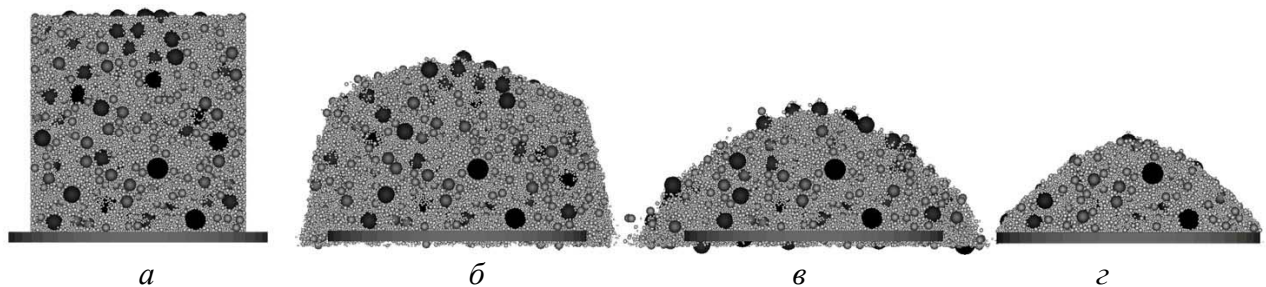


Рис. 3.4. Етапи моделювання формування гірки сипучого матеріалу методом МДЕ:
 $a - \tau = 0 \text{ с}; \tau = 0 \text{ с}; b - \tau = 0,2 \text{ с}; v - \tau = 1 \text{ с}; z - \tau = 2 \text{ с}$

За результат приймалися дані на кінець розрахунку ($\tau = 2 \text{ с}$), що являли собою просторові координати центрів кожної гранули системи, які не покинули розрахункову область.

Отримана інформація оброблялася з використанням спеціально розробленого алгоритму. Даний алгоритм для визначення КПУ є антологічним наведеному вище (див. рис. 3.2), але ґрунтується на даних, що отримано методом МДЕ.

Результати розрахунків доводять, що модель МДЕ реалістично відтворює статичну поведінку сипучих матеріалів, зокрема формування КПУ, та за необхідності, досліджувати динаміку процесу.

Проведений числовий аналіз показав, що на обчислений за допомогою МДЕ КПУ істотний вплив чинять ефективні значення коефіцієнтів тертя ковзання μ_s та кочення μ_r (див. рівняння (2.1)). Тому була проведена серія числових експериментів з різними значеннями μ_s та μ_r , результати яких представлено у таблиці 3.2.

Як видно з таблиці 3.2 простежується пряма залежність між μ_s , μ_r та результуючими параметрами гірки матеріалу (КПУ, висота). Хоча за значень $\mu_s = 0,8$, $\mu_r = 0,8$ висота гірки є найвищою, але КПУ є меншим, ніж при $\mu_s = 0,7$, $\mu_r = 0,7$, це можна пояснити несиметричністю отриманої гірки сипучого матеріалу.

Таблиця 3.2 – Результати числових експериментів з формування гірки сипучого матеріалу з різними значеннями μ_s та μ_r

μ_s	μ_r	КПУ, °	Висота гірки, м	Кількість частинок в гірці
0,3	0,3	27,04	0,031	57742
0,4	0,4	35,14	0,037	71908
0,5	0,5	36,60	0,042	81566
0,6	0,6	37,95	0,046	88860
0,7	0,7	46,06	0,047	96301
0,8	0,8	45,39	0,050	101885

Кількість гранул у розрахунковій системі обмежується тільки доступними обчислювальними ресурсами. Так, наприклад, числове моделювання руху 262560 частинок протягом 2 с фізичного часу з кроком інтегрування 10^{-6} с на комп'ютері (Intel Core i5-760, 4 ядра 2,8 GHz), займає близько 19–20 год розрахункового часу. Отже, проведення числового аналізу динаміки сипучих матеріалів промислового масштабу є досить проблематичним.

Одними із способів спрощення даної задачі можуть бути: заміна реального гранулометричного складу сипучого матеріалу на подібний з меншим розкидом розмірів частинок або частинками еквівалентного діаметра. Проведена серія числових експериментів із формування КПУ системою з 12315 частинок, що мають еквівалентний діаметр 4 мм з різними значеннями μ_s (від 0,1 до 1,0) і μ_r (від 0,1 до 1,0). При цьому час, потрібний для кожного числового експерименту, скоротився до (0,8–0,9) год. Результати проведеного числового аналізу представлено на рис. 3.5.

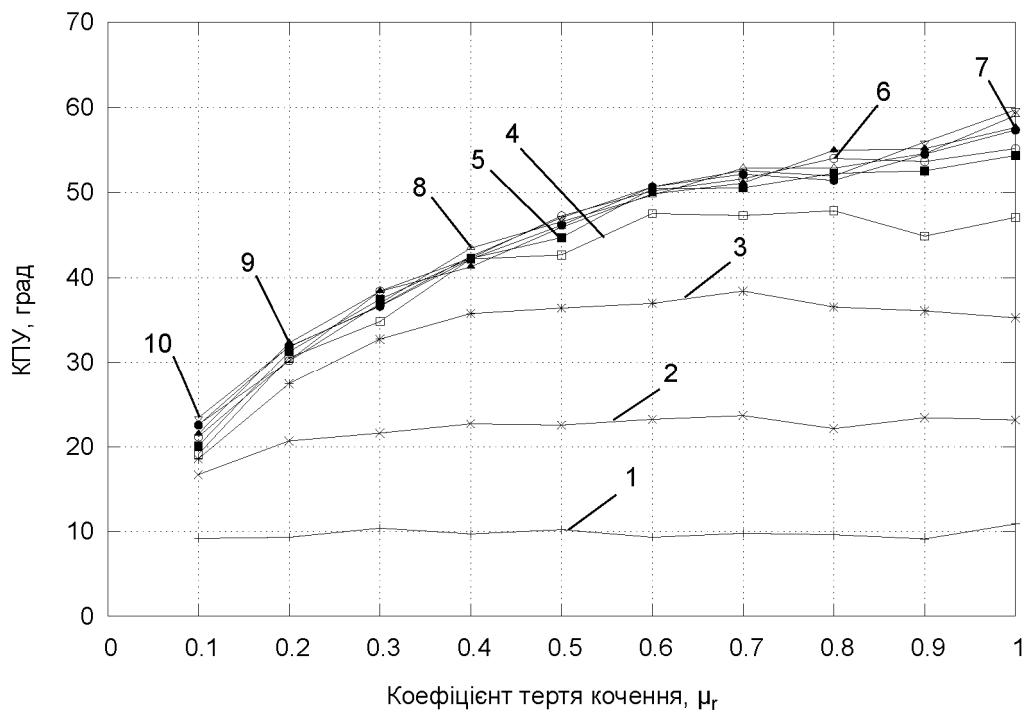


Рис. 3.5. Розрахунковий КПУ при різних значеннях μ_s та μ_r :
 1 – $\mu_s = 0,1$; 2 – $\mu_s = 0,2$; 3 – $\mu_s = 0,3$; 4 – $\mu_s = 0,4$; 5 – $\mu_s = 0,5$; 6 – $\mu_s = 0,6$;
 7 – $\mu_s = 0,7$; 8 – $\mu_s = 0,8$; 9 – $\mu_s = 0,9$; 10 – $\mu_s = 1$

З рис. 3.5 видно як варіюється значення КПУ при різних комбінаціях μ_s та μ_r . Дана числова модель зі сферами еквівалентного діаметра показує таке:

- за малих значень $\mu_s = (0,1 - 0,2)$ частинки майже не формують гірку, зсипаються з круглої пластини, про це свідчить низьке значення КПУ, що не змінюється зі збільшенням μ_r ;
- для $\mu_s \geq 0,5$ значення КПУ при різних μ_r – мають майже однаковий характер зміни, а значення відрізняються в межах (3–4) %;
- за високих значень $\mu_r \geq 0,6$ і $\mu_s \geq 0,5$ система гранул формує гірку з КПУ, що є характерними для порошкових або вологих матеріалів.

Загалом, проведені розрахунки методом МДЕ з використанням частинок з еквівалентним діаметром, показали, що застосування ефективних значень коефіцієнтів тертя ковзання μ_s і кочення μ_r дає можливість моделювати статику різних сипучих матеріалів, що мають різний гранулометричний склад та форму гранул.

Проведені числові експерименти дали можливість зіставити результати математичного моделювання за допомогою МДЕ та натурних вимірювань КПУ. Враховуючи те, що дослідний матеріал є не ідеальним сипучим

матеріалом (форма гранул відрізняється від сферичної, гранулометричний склад визначається лише на статистичному рівні, кількість окремих гранул визначити неможливо), тому точного відтворення поведінки конкретної дози або такого матеріалу досягти неможливо та недоцільно. Тому при математичному моделюванні поведінки сипучих матеріалів методом МДЕ використовують наближений чи ефективний гранулометричний склад гранул [62, 71]. Крім того, застосування визначених коефіцієнтів тертя ковзання μ_s і кочення μ_r дає змогу відтворювати поведінку реальних матеріалів.

Співставлення результатів числових експериментів і натурних вимірів КПУ представлено на рис. 3.6.

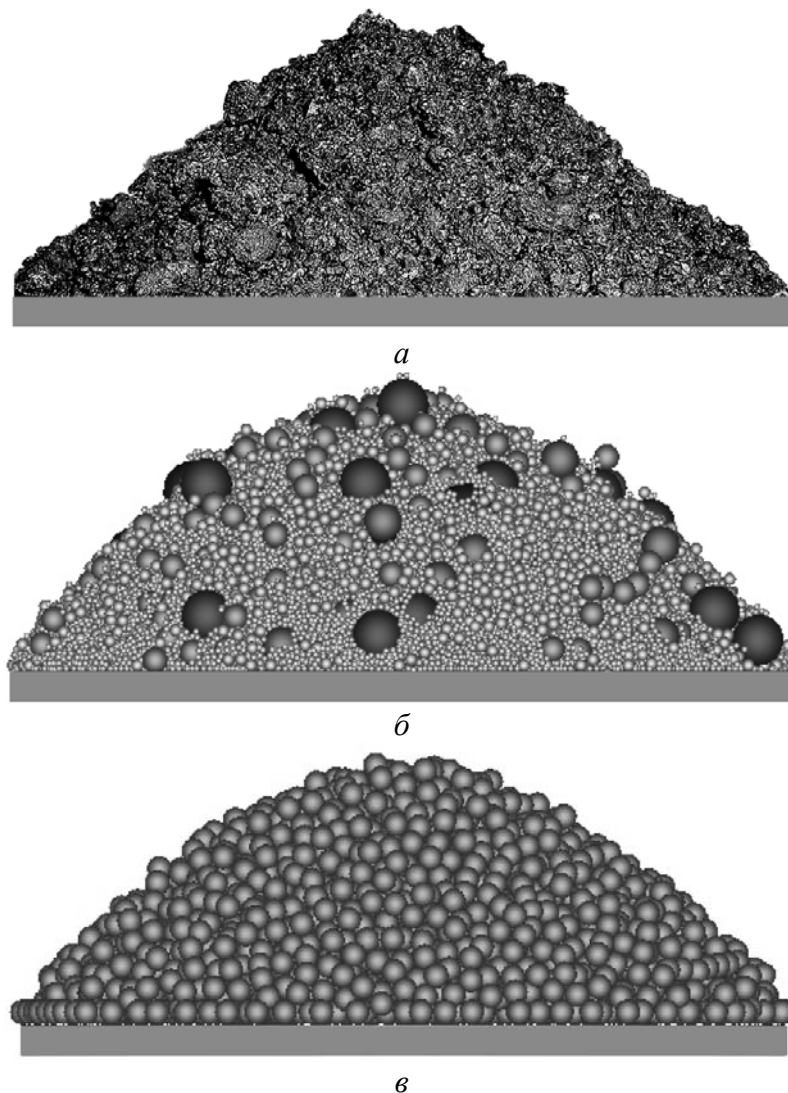


Рис. 3.6. Гірка матеріалу на круглій основі, що отримана різними методами:
a – експериментальні виміри КПУ нафтового коксу; *б* – МДЕ, при діаметрі частинок від 1 мм до 13 мм та $\mu_s = 0,6$, $\mu_r = 0,6$; *в* – МДЕ, при еквівалентному діаметрі частинок 4 мм та $\mu_s = 0,6$, $\mu_r = 0,3$

Аналіз представлених даних показав наступне:

- експериментально вимірний КПУ нафтового коксу гранулометричним складом (1–13) мм, методом фотографування та обробки цифрових знімків за спеціально розробленим алгоритмом, становить $(38,9 \pm 1,9)^\circ$. Один із вимірів КПУ представлено на рис. 3.6,а;
- система, яка складається з частинок сферичної форми діаметром 1-13 мм, при значеннях ефективних коефіцієнтів тертя ковзання $\mu_s = 0,6$ і кочення $\mu_r = 0,6$ формує КПУ, який найбільше відповідає експериментально виміряному значенню (похибка складає 2,5 %) (рис. 3.6,б);
- система з еквівалентних сфер діаметром 4 мм при значеннях $\mu_s = 0,6$ і $\mu_r = 0,3$ формує КПУ, що найбільше відповідає виміряному експериментально (похибка складає 1,3 %) (рис. 3.6,в).

За даними літературних джерел [121] КПУ антрациту становить $40\text{--}45^\circ$, що відповідає виміряному значенню для нафтового коксу. Зважаючи на особливості математичного формулювання МДЕ не має значної різниці між моделюванням системи з еквівалентних сфер діаметром 4 мм (для нафтового коксу) чи 40 мм (для антрациту) при інших ідентичних умовах, тому подальші результати можуть бути віднесені до обох досліджуваних матеріалів.

Зіставлення даних числового аналізу з експериментом із визначення КПУ, підтверджують можливість застосування методу МДЕ для розв'язання задач, пов'язаних з поведінкою сипучих середовищ.

3.1.2. Щільний рух сипучого матеріалу у складному циліндричному каналі

Рух матеріалу у відомих конструкціях промислових електрокальцинаторів виробництва компаній «Elkem», «Сибелектротерм», «Електротерм», створюється силою гравітації та обертовими лопатками (рис. 3.7). Лопатки рухаються концентрично до осі печі та знімають частину матеріалу з розвантажувального стола. Якщо розглянути процес розвантажувальності більш детально (спостереження за роботою розвантажувального пристрою електрокальцинатора на ПАТ «Укрграфіт»), видно, що:

- між розвантажувальним столом та циліндричною стінкою печі є вертикальна щілина, у яку висипається матеріал;
- сипучий матеріал не може вільно рухатися вздовж розвантажувального столу, а осипається та формує зрізаний конус з висотою, що дорівнює розміру вертикальної щілини (фактично формується гірка матеріалу з КПУ) та основою на столі;

- щоб зрушити з місця матеріал, лопатки занурені всередину утвореного конуса та обертаються, зіштовхуючи частину гранул з розвантажувального столу;
- швидкість обертання лопаток невелика ($0,001\text{--}0,015\text{ с}^{-1}$), тому матеріал встигає почати рухатися та зайняти звільнене лопатками місце, а потім зупинитися, та знову сформувавши КПУ.

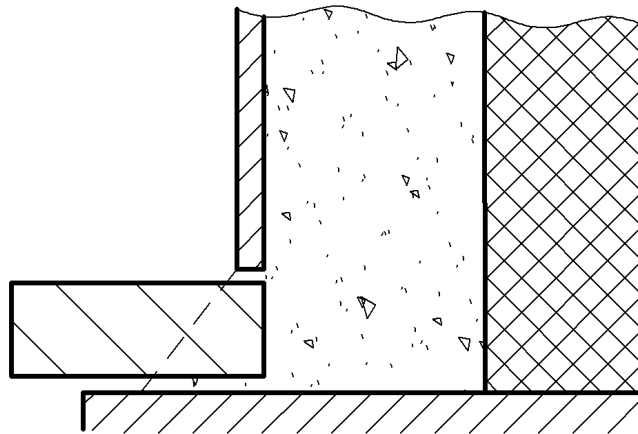


Рис. 3.7. Обертові лопатки, механізму розвантаження електрокальцинатора

Зважаючи на вищезазначене, найбільш коректним уявленням про рух матеріалу в електрокальцинаторі буде рух створений обертовими лопатками. Тому моделювання динаміки гранул проводилося саме з використанням рухомих лопаток, що взаємодіють з частинками системи. Також, виходячи з того, що матеріал встигає осипатися та зупинитися при повільному обертанні лопаток, моделювання можна виконувати без прив'язки до реальної швидкості обертання, а використовувати достатнє її значення для відтворення цього процесу.

Спрощена модель електрокальцинатора для визначення тенденцій руху сипучого матеріалу представлена на рис. 3.8 і являє собою циліндричний корпус з розташованим всередині циліндром та плоским круглим столом, з якого зсипаються гранули та чотири обертові лопатки. Геометричні розміри моделі прив'язані до розміру гранул d (діаметр) у системі. Було розглянуто чотири варіанти, для яких однаковими були такі розміри: висота циліндричної стінки $h_1 = 100d$ (для варіанту 2 – $h_1 = 200d$), висота внутрішнього циліндра $h_2 = 30d$, висота щілини між столом та циліндричною стінкою $h_3 = 5d$, розмір лопаток – брус (висота×ширина×довжина – $5d \times 1d \times 15d$). Різні значення приймали внутрішній діаметр циліндричної стінки d_1 , діаметр внутрішнього циліндра d_2 та швидкість обертання лопаток ω . Їхні значення приймалися виходячи із таких співвідношень d_1/d_2 :

- варіант № 1 – $20d/5d$ (співвідношення $d_1/d_2 = 4/1$), $\omega = 5 \text{ с}^{-1}$;
- варіант № 2 – $40d/10d$ (співвідношення $d_1/d_2 = 4/1$, але розміри в 2 рази більше), $\omega = 5 \text{ об/с}$;
- варіант № 3 – $30d/3d$ (співвідношення $d_1/d_2 = 10/1$), $\omega = 5 \text{ с}^{-1}$;
- варіант № 4 – $40d/20d$ (співвідношення $d_1/d_2 = 2/1$), $\omega = 5 \text{ с}^{-1}$;
- варіант № 5 – $20d/5d$ (співвідношення $d_1/d_2 = 4/1$), $\omega = 10 \text{ с}^{-1}$;
- варіант № 6 – $40d/10d$ (співвідношення $d_1/d_2 = 4/1$, але розміри в 2 рази більше), $\omega = 10 \text{ с}^{-1}$.

Такі співвідношення дають змогу визначити загальні тенденції руху сипучого матеріалу і можуть бути зведені до безрозмірного вигляду.

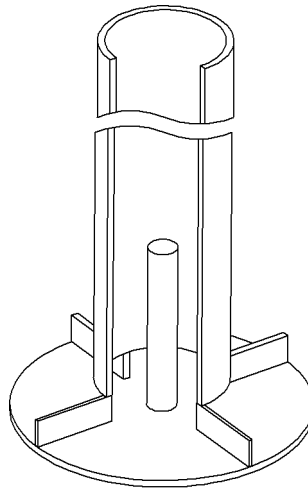


Рис. 3.8. Спрощена модель електрокальцинатора

Моделювання методом МДЕ виконувалося зі сферичними частинками еквівалентного діаметра $d=4$ мм. Властивості матеріалу частинок вказані у таблиці 3.1. Коефіцієнти тертя кочення та ковзання приймалися з урахуванням вище наведених даних – $\mu_s = 0,6$, $\mu_r = 0,3$.

При числовому моделюванні використовувався крок за часом $\Delta\tau = 10^{-5}$ с, розрахунки проводилися на протязі 500 с (1000 с для $\omega = 10$ Гц) фізичного часу, тобто моделювалася поведінка системи упродовж ста повних обертів лопаток. Така кількість обертів давала можливість повністю видалити матеріал із моделі кальцинатора.

Динаміка сипучих матеріалів відрізняється від динаміки рідин. Відомо, що гранули осипаються нерівномірно та можуть утворювати затори. Але якщо аналізувати їх рух відносно великих часових кроків, то загальна картина руху буде рівномірною та усталеною. Також слід враховувати постійність обертання лопаток та рівномірність їх розташування відносно вісі геометрії.

Тоді доцільно розглядати поведінку динамічної системи відносно періоду обертання лопаток.

Використання методу осереднення швидкості для даних задач у дискретному формулюванні (див. (2.21)) дає змогу представити отримані результати як стаціонарне нерозривне поле швидкості сипучого матеріалу у внутрішньому просторі геометричної моделі електропечі. Враховуючи вісесиметричність геометрії, раціонально осереднити результати до радіальних координат (рис. 3.9).

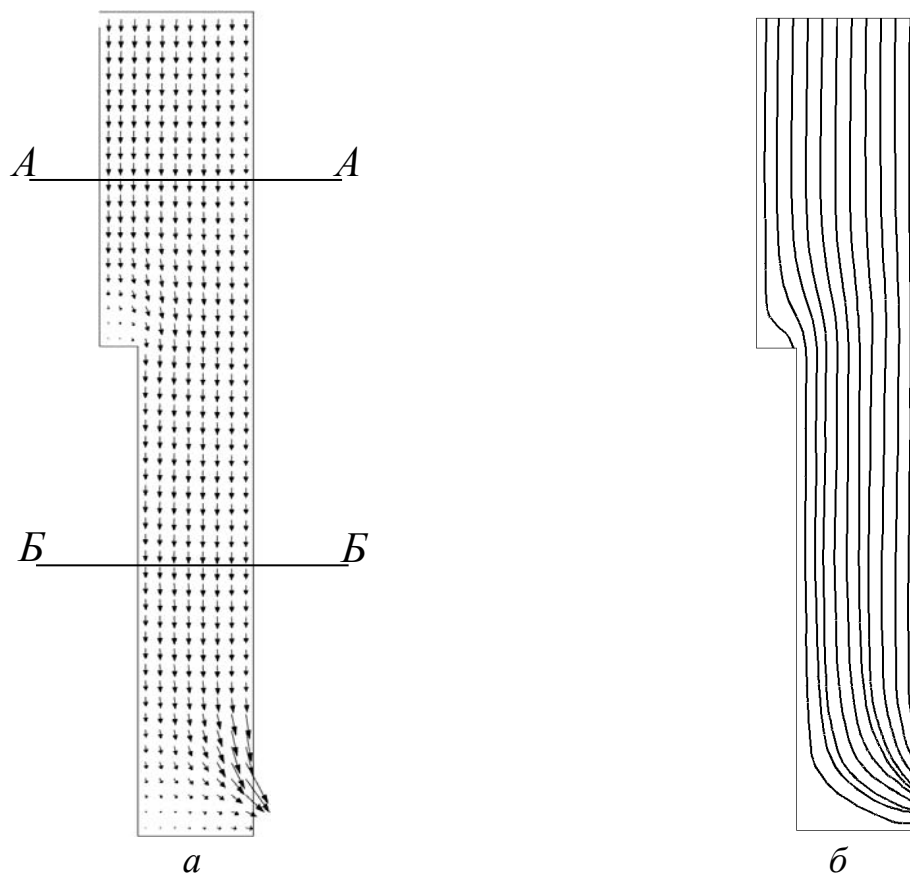


Рис. 3.9. Динаміка руху частинок, варіант № 1:

a – осереднене векторне поле швидкості частинок \bar{V} ; b – лінії току частинок

Важливим чинником осереднення є вибір проміжку часу, за який воно буде проводитися. Коли в початковий момент часу частинки були нерухомі та щільно заповнювали розрахункову область, їхній рух, що створюється лопатками, починається поступово. Спочатку з місця зрушують нижні шари гранул, а потім верхні. Тобто повинен пройти деякий час, щоб усі частинки почали рухатися. У цій задачі, за час коли всі частинки прийшли до руху, можна вважати період одного повного обертання лопаток. Тому осереднення за часом проводилося за 4 повні оберти, починаючи з 4 обертів лопаток.

З рис. 3.9 видно чотири основних зони руху: перша – усталений рух у циліндричному каналі; друга – перехідна зона між циліндричним та кільцевим каналами, де видно гірку нерухомого матеріалу, що лежить на внутрішньому циліндрі; третя – усталений рух у кільцевому каналі; четверта – зона біля щілини, через яку матеріал осипається на стіл, також видно, що частину нерухомого матеріалу на куті між столом та внутрішнім циліндром. Найбільший інтерес представляють профілі швидкості частинок в обох усталених зонах. Далі вони будуть представлені і у двох перерізах – *A*, *B*.

Виходячи із форми перерізів: *A* – круглий, *B* – кільцевий, можна визначити середню інтегральну швидкість

$$\tilde{V} = \frac{1}{S} \int_S \bar{V} dS, \quad (3.1)$$

де $S = \pi d_1^2 / 4$ – для круглого перерізу, $S = \pi d_1^2 / 4 - \pi d_2^2 / 4$ для кільцевого перерізу.

Значення розмірної та безрозмірної швидкості наведено в додатку А.

Аналізуючи отримані дані можна стверджувати, що для всіх варіантів профілі швидкостей віднесені до їх інтегральних значень і приведені до безрозмірної радіальної координати, можна апроксимувати залежностями виду (3.2) – для круглого та (3.3) – для кільцевого каналів:

$$\frac{\bar{V}(\bar{r})}{\tilde{V}} = a + b \sinh\left(\frac{\bar{r} + c}{d}\right), \quad (3.2)$$

$$\frac{\bar{V}(\bar{r})}{\tilde{V}} = a + b \cosh\left(\frac{\bar{r} + c}{d}\right). \quad (3.3)$$

Використовуючи метод Levenberg–Marquardt [85] для розв’язання нелінійної задачі найменших квадратів, були отримані відповідні коефіцієнти для рівнянь (3.4) та (3.5):

$$\frac{\bar{V}(\bar{r})}{\tilde{V}} = 1.0916 - 9,7526 \cdot 10^{-10} \sinh\left(\frac{\bar{r} + 1,5552}{0,1246}\right), \quad (3.4)$$

$$\frac{\bar{V}(\bar{r})}{\tilde{V}} = 1,0753 - 0,0012 \cosh\left(\frac{\bar{r} - 0,484}{0,0766}\right). \quad (3.5)$$

Коефіцієнти детермінації для рівнянь (3.4) і (3.5) становлять 0,984 та 0,926, відповідно.

На рис. 3.10 наведено отримані залежності профілів безрозмірної швидкості.

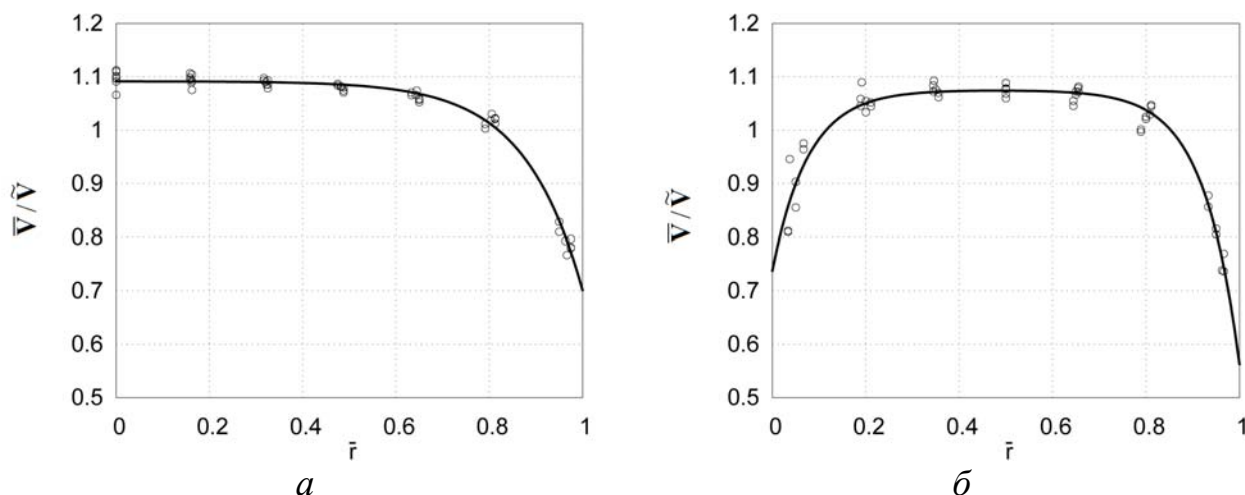


Рис. 3.10. Профіль безрозмірної швидкості для різних каналів:
а – для циліндричного каналу; б – для кільцевого каналу

З рис. 3.10 видно, що характер руху сипучого матеріалу у круглому та кільцевому каналах є подібним та не залежить від розмірів каналу та витрати матеріалу, що створюється обертанням лопаток. Ці дані добре корелюються з результатами натурних експериментів та числового моделювання руху сипучого матеріалу у щілинному каналі інших авторів, що до загального вигляду безрозмірного профілю швидкості [48–53, 86].

3.2. Апробація OpenFOAM для задач теплового та теплоелектричного стану твердих тіл

Для апробації програмного коду OpenFOAM проведена серія тестів та їх порівняння з відповідними аналітичними розв'язками, а також з числовими розв'язками, отриманими за допомогою комерційного програмного забезпечення (КПЗ) (Додаток Б).

При проведенні тестів використовувалися інструменти доступні в OpenFOAM для реалізації розв'язувачів, які можуть моделювати тепловий та теплоелектричний стан твердих тіл. Тестування виконувалося для на таких задачах [100, 101]:

- стаціонарна теплопровідність;
- стаціонарна теплопровідність з внутрішнім джерелом теплоти;
- нестаціонарна нелінійна теплопровідність з внутрішнім джерелом

теплоти;

- стаціонарна зв'язана електротермічна задача;
- нестационарна зв'язана нелінійна електротермічна задача.

Результати проведених розрахунків корелюються з точними розв'язками та з результатами, одержаними за допомогою КПЗ. Похибка розрахунків за зазначеними тестами лежить в межах (0,1–0,6) %.

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ТЕРМІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ СИПУЧИХ ВУГЛЕЦЕВИХ МАТЕРІАЛІВ В ЕЛЕКТРОКАЛЬЦИНАТОРІ

Завдання експериментальних досліджень процесу високотемпературного оброблення рухомого шару сипучих вуглецевих матеріалів у електрокальцинаторі полягають у визначенні:

- теплофізичних властивостей оброблюваних матеріалів;
- електричних показників роботи печі;
- рівня температури футеровки печі як характеристики поля температур оброблюваних матеріалів;
- інших технологічних параметрів роботи електрокальцинатора, зокрема, виходу летючих і втрати маси матеріалу за рахунок окиснення для складання матеріального балансу та оцінки величини внутрішнього джерела за рахунок хімічних реакцій, характеристик зовнішнього теплообміну тощо;
- проведенні аналізу теплоелектричного стану процесу прожарювання матеріалів в електрокальцинаторі для виявлення недоліків у роботі обладнання та визначення основних напрямів для його модернізації з метою забезпечення потрібної якості готового продукту, підвищення продуктивності при зменшенні ПВЕ та збільшенні терміну експлуатації устаткування.

Експериментальні дані в подальшому використовуються для визначення закономірностей процесу високотемпературного оброблення в електропечах, проведення верифікації розроблених числових моделей та задавання граничних умов для виконання числового аналізу, розробки нових та більш досконалих конструкцій електрокальцинаторів та регламентів їх експлуатації, що забезпечують високі показники якості готового продукту та довговічності пічного обладнання.

4.1. Експериментальні дослідження теплофізичних властивостей сипучих вуглецевих матеріалів, які оброблюються в електрокальцинаторі

Проведення комплексних експериментальних досліджень на діючих промислових електрокальцинаторах характеризується складністю і вимагає значних часових та матеріальних затрат. Використання сучасних обчислювальних технологій для математичного моделювання фізичних процесів в електрокальцинаторі є важливим етапом у комплексних теоретичних дослідженнях [39]. Для створення адекватних та реалістичних числових моделей необхідні дані про фізичні властивості використовуваних матеріалів та дані натурних експериментів на діючому обладнанні для їх верифікації.

Основним показником якості одержуваного продукту в електрокальцинаторі є значення його ПЕО за кімнатної температури, подрібненого до порошкоподібного стану (ПЕО_п). Технологія прожарювання вуглецевих матеріалів передбачає відповідні допустимі межі значень ПЕО_п, як для обробленого антрациту, так і для нафтового коксу, крім того для нафтового коксу регламентується також значення істинної густини ($\rho_{\text{іст}}$):

- антрацит – ПЕО_п < 1000 мкОм·м;
- нафтовий кокс – ПЕО_п < 150 мкОм·м, $\rho_{\text{іст}}$ > 2200 кг/м³.

Для досягнення вказаних значень фізичних властивостей необхідно, щоб термічне оброблення матеріалу за наперед заданої температури прожарювання – $T_{\text{пр}}$ тривало не менше певного часу $\tau_{\text{пр}}$, що відповідає $T_{\text{пр}}$. Значення величин $T_{\text{пр}}$ і $\tau_{\text{пр}}$ визначаються у лабораторних умовах з використанням, наприклад, печей Тамана та установок для одержання даних з ПЕО [13] і відносяться до вирішальних технологічних параметрів процесу.

У праці [87] проведено дослідження ПЕО_п та зміни кристалічної структури антрациту, який пройшов попередню термообробку за температури 1200 °С при зміні температури від 1200 °С до 2500 °С з ізотермічною витримкою протягом однієї години. Результати даного дослідження наведені на рис. 4.1,а.

Значення ПЕО_п антрациту за різної температури прожарювання та часу ізотермічної витримки також досліджувалися в працях [13, 102, 103], результати яких наведені на рис. 4.1,б, 4.1,в.

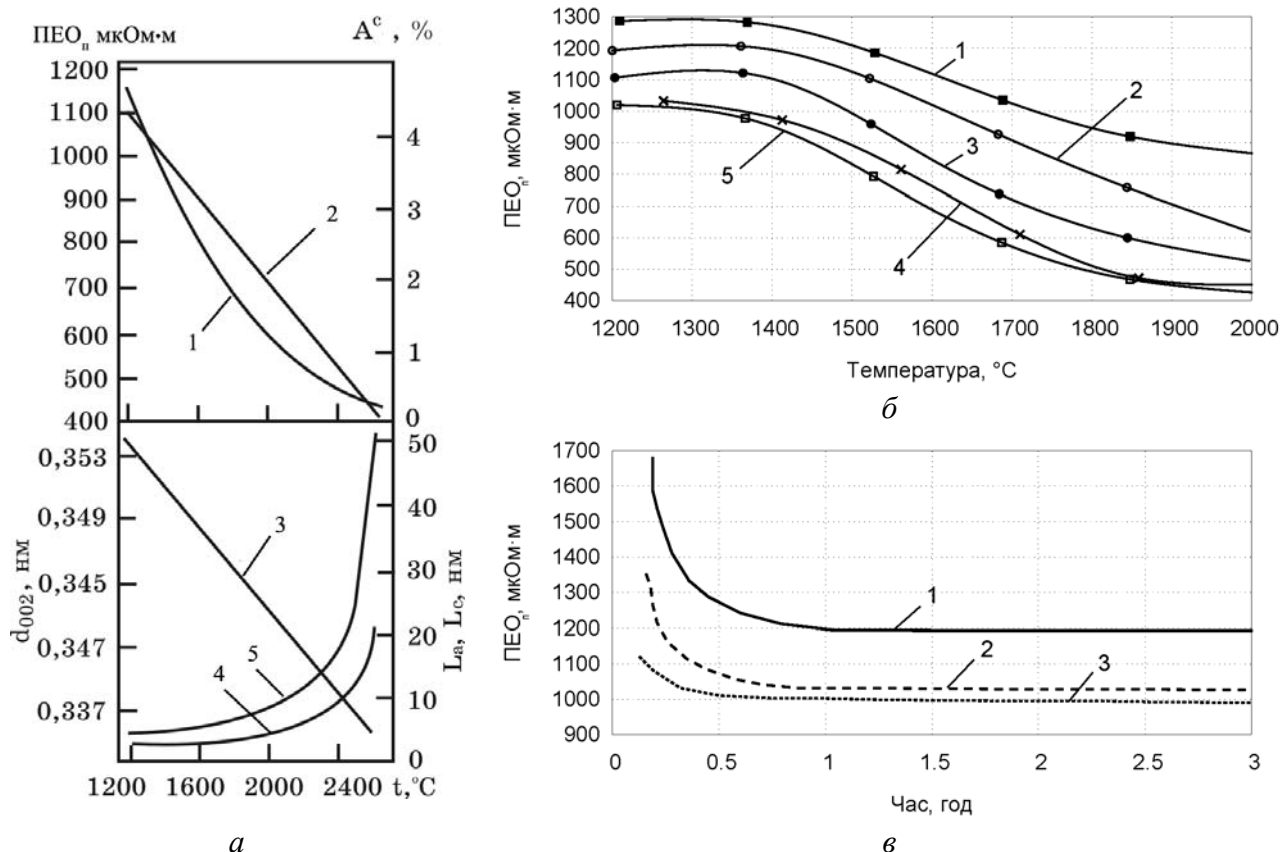


Рис. 4.1. Вплив температури оброблення та часу ізотермічної витримки на показники кристалічної структури та значення ПЕО_п антрациту:

а – вплив $T_{пр}$ за ізотермічної витримки 1 год на кристалічну структуру антрациту [87]:

1 – ПЕО_п; 2 – вміст золи A^c ; 3 – міжшарова відстань d_{002} ; 4, 5 – розміри кристалів L_a і L_c , відповідно; б – вплив $T_{пр}$ на ПЕО_п антрациту при різних значеннях $\tau_{пр}$ [102, 103]:

1 – $\tau_{пр} = 0$ год; 2 – $\tau_{пр} = 0,5$ год; 3 – $\tau_{пр} = 1$ год; 4 – $\tau_{пр} = 2$ год; 5 – $\tau_{пр} = 4$ год;

в – вплив $\tau_{пр}$ на ПЕО_п антрациту при різних значеннях $T_{пр}$ [13]: 1 – $T_{пр} = 1100$ °C; 2 – $T_{пр} = 1200$ °C; 3 – $T_{пр} = 1300$ °C

Дослідження фізичних властивостей сирого антрациту та антрациту, що пройшов термооброблення на різному лабораторному та виробничому обладнанні, проведені на ПАТ «Укрграфіт», дали змогу отримати дані з фізико-хімічних властивостей, що зведені до табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Фізико-хімічні властивості антрациту

Властивість	Сирий антрацит	Антрацит після 1100–1250 °С (обертюва піч)	Антрацит після 1600 °С	Антрацит після ~2750 °С [104]
ПЕО _п , мкОм·м	4991	1162	783	510
Густина уявна, кг/м ³	990	1071	1095	-
Густина істинна, кг/м ³	1780	1840	1863	1870
Склад:				
зола, %	5,8	4,8	3,8	3,0
летючі, %	1,8	1,0	0,1	-
сірка, %	1,3	0,0	0,14	-
волога, %	4,0	1,0	0,0	-

З наведених даних видно, що для одержання якісного термічно обробленого антрациту електрокальцинатор повинен забезпечувати такі значення вирішальних технологічних параметрів процесу:

- мінімальна температура в зоні прожарювання робочого простору печі – $T_{\text{пр}} = 1300 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- мінімальний час перебування матеріалу в зоні прожарювання – $\tau_{\text{пр}} = 2 \text{ год.}$

Для визначення значень $T_{\text{пр}}$ і $\tau_{\text{пр}}$ для графітування нафтового коксу в електрокальцинаторі в лабораторії ПАТ «Укрграфіт» проведено дослідження фізико-хімічних властивостей та кристалічної будови даного матеріалу за високих температурах. Слід зазначити, що нафтовий кокс, який проходить високотемпературне оброблення в електрокальцинаторі, попередньо прожарюється у обертювих барабанних печах (за температури 1100 °С) для зменшення вмісту летючих газів і зневоднення. Результати лабораторного дослідження наведені в табл. 4.2 і 4.3.

Проведені лабораторні дослідження дали можливість визначити вимоги до електрокальцинатора для забезпечення процесу графітування нафтового коксу:

- мінімальна температура в зоні прожарювання – $T_{\text{пр}} = 2200 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- мінімальний час перебування матеріалу в зоні прожарювання – $\tau_{\text{пр}} = 2 \text{ год.}$

Значний вплив на процес термічної обробки та енергоспоживання в електрпечі має ПЕО і теплопровідність сировини – антрациту та нафтового коксу. Відомі з літературних джерел дані з ПЕО та теплопровідності цих

матеріалів показують, що їх величини залежать від місця походження, хімічного, структурного, фракційного складу, температури та тиску [10, 111].

Таблиця 4.2 – Фізико-хімічні властивості нафтового коксу

Властивість	Сирий нафтовий кокс
Фракційний склад, мм	-13+1
ПЕО _п , мкОм·м	515
Густина уявна, кг/м ³	800
Густина істинна, кг/м ³	2060
Склад:	
зола, %	0,2
летючі, %	-
сірка, %	0,4
волога, %	-

Таблиця 4.3 – Фізичні властивості нафтового коксу залежно від температури і тривалістю обробки

Термооброблення до температури, °С	Витримка, год	Густина істинна, кг/м ³	ПЕО _п , мкОм·м	Ступінь графітування, γ	L _a , нм	L _c , нм
2000	2	2210	260	0,35	15	<10
2200	1	2180	184	0,5	14±4	23±4
2200	2	2220	115	0,7	20±2	27
2400	1	2240	93	0,74	20±2	28±4
2400	2	2240	92	0,75	20±2	28±4

З метою проведення вимірювання ПЕО та теплопровідності антрациту та нафтового коксу використано спеціалізовані установки, які розроблені в НДЦ «Ресурсозберігаючі технології» НТУУ «КПІ» [83, 95].

Установка для вимірювання ПЕО сипучих вуглецевих матеріалів [120] являє собою вертикальну керамічну трубу (порожнистий циліндр), ззовні якої розміщений спіральний нагрівник 1 (рис. 4.2). Внутрішній простір порожнистого циліндра утворює вимірювальну комірку, всередині якої досліджуваний матеріал 2 затискується зверху і знизу графітовими електродами 3 з певним зусиллям F . Електроди мають розмір внутрішнього діаметра труби. Вимірювальна комірка має торцеву 4 та радіальну 5 теплоізоляцію для зменшення теплових втрат [105].

Досягнення необхідного температурного режиму та рівномірного температурного поля в об'ємі вимірювальної комірки здійснюється за допомогою регулювання потужностей спірального нагрівника 1 та

внутрішнього джерела теплоти досліджуваного матеріалу. Задання потужності спірального нагрівника і струму, що проходить через досліджуваний матеріал, здійснюється за допомогою регуляторів 6 і 7, відповідно.

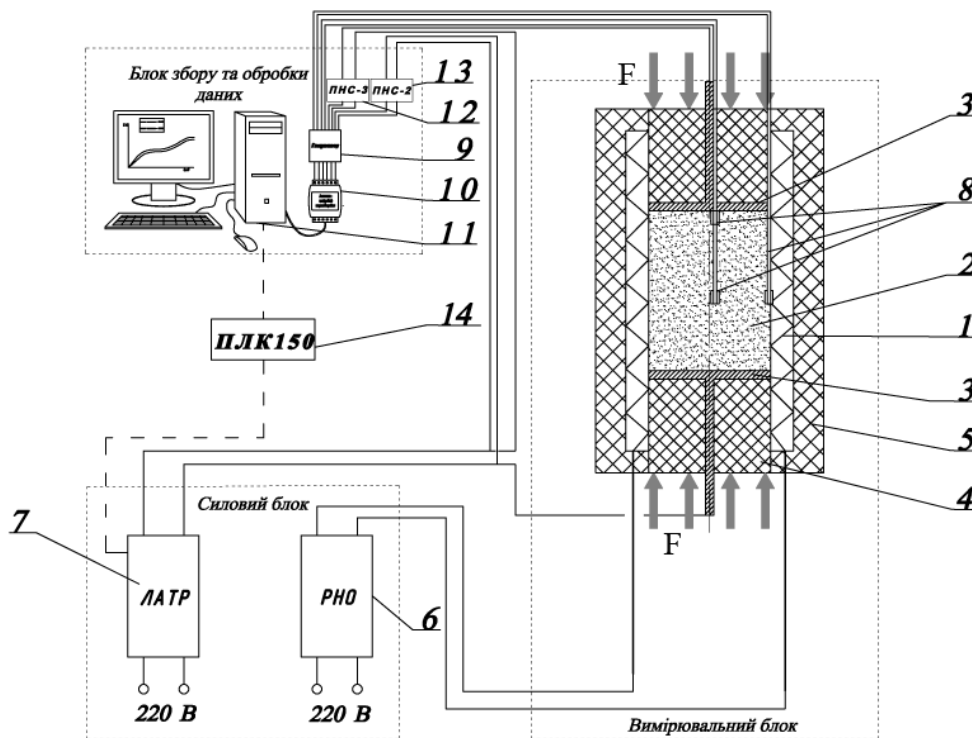


Рис. 4.2. Блок-схема установки для визначення ПЕО сипучих вуглецевих матеріалів:
 1 – спіральний нагрівник; 2 – досліджуваний матеріал; 3 – графітовий електрод; 4 – торцева теплоізоляція; 5 – радіальна теплоізоляція; 6 – регулятор напруги спірального нагрівника;
 7 – регулятор напруги для вимірювальної ділянки; 8 – термопар; 9 – комутуючий пристрій; 10 – аналого-цифровий перетворювач; 11 – блок обробки і реєстрації даних (ПК);
 12 – перетворювач струму; 13 – перетворювач напруги; 14 – програмований контролер

Температура досліджуваного зразка визначається як середнє значення показів двох хромель-алюмелевих термопар 8, одна з яких установлюється на внутрішній стінці керамічної труби посередині дослідної ділянки, а друга – по осі труби.

Значення падіння напруги на торцях досліджуваного матеріалу та електричного струму, який проходить крізь нього, надходять на блок збирання і оброблення даних, який складається з комутуючого пристрою 9, аналого-цифрового перетворювача 10 і блоку обробки і реєстрації даних (ПК) 11. Вимірювання струму та напруги здійснюється за допомогою перетворювачів 12 і 13. Підтримування заданої потужності внутрішнього джерела теплоти в зразку 2 забезпечується регулятором 7 за допомогою програмованого контролера 14.

Технічні характеристики установки:

- діапазон вимірюваних величин (100–800000) мкОм·м;
- температурний діапазон (293–1273) К;
- діапазон створюваного тиску від 1,5 до 50 кПа;
- похибка вимірювання ПЕО не перевищує 15 %.

Установка для вимірювання коефіцієнта теплопровідності представлена у вигляді принципової схеми на рис. 4.3 [106,107]. Установку можна умовно розділити на три частини: вимірювальний блок, силовий блок, блок збирання та оброблення даних.

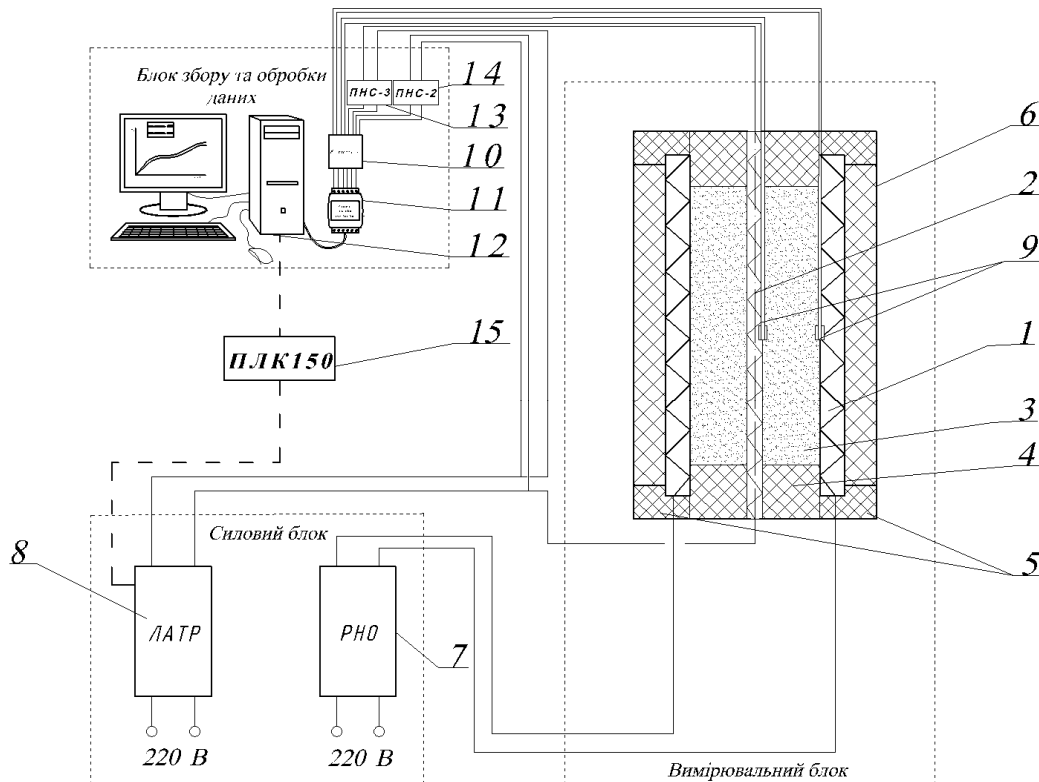


Рис. 4.3. Блок-схема установки для визначення коефіцієнта теплопровідності сипучих вуглецевих матеріалів:

1 – фоновий нагрівник; 2 – центральний нагрівник; 3 – досліджуваний матеріал; 4 – мулітокремнеземисті пробки; 5 – мулітокремнеземисті фасонні плити; 6 – вогнетривка вата; 7 – регулятор напруги для фонового нагрівника; 8 – регулятор напруги для центрального нагрівника; 9 – термопари; 10 – комутуючий пристрій; 11 – аналого-цифровий перетворювач; 12 – блок обробки і реєстрації даних (ПК); 13 – перетворювач напруги; 14 – перетворювач струму; 15 – програмований контролер

Вимірювальний блок представляє собою конструкцію із нагрівального вузла та теплоізоляції. Нагрівальний вузол складається з фонового нагрівника 1, виготовленого зі спіралі високого електричного опору, і центрального карбідкремнієвого нагрівника 2, розміщених концентрично та утворюючих кільцевий зазор, у якому розташовують зразок досліджуваного матеріалу 3.

На торцях дослідного зразка встановлені мулітокремнеземисті пробки 4 з осьовими отворами для центрального нагрівника, які щільно закривають вимірювальну комірку, знижуючи нерівномірність температурного поля по її висоті. Мулітокремнеземисті пробки 4 і фасонні плити 5, які затискують фоновий нагрівник 1 з торців, служать для зменшення теплових втрат в осьовому напрямку, а теплоізоляційний шар вогнетривкої вати 6, розташований із зовнішньої сторони фонового нагрівника 1, для зменшення теплових втрат у радіальному напрямку.

Досягнення необхідного температурного режиму здійснюється фоновим 1 і центральним 2 нагрівниками. Регулювання потужності нагрівників виконується силовим блоком, що включає регулятори напруги 7 і 8 для живлення відповідно фонового 1 та центрального 2 нагрівників. Сигнали із хромель-алюмелевих термопар 9, розміщених всередині вимірювальної комірки, надходять на блок збору та обробки даних, що складається з комутуючого пристрою 10, аналого-цифрового перетворювача 11 і блоку обробки і реєстрації даних (ПК) 12 [108]. Вимірювання струму та напруги здійснюється за допомогою перетворювачів 13 і 14. Підтримування постійної потужності на центральному нагрівнику 2 забезпечується регулятором 8 за допомогою програмованого контролера 15.

Температурні рівні вимірювань встановлюються за допомогою фонового нагрівника через регулятор електричної напруги 7.

Технічні характеристики установки:

- робочий діапазон температури від (293–1273) °C;
- діапазон вимірюваного коефіцієнта теплопровідності (0,3–3) Вт/(м·К);
- похибка вимірювання коефіцієнта теплопровідності становить не більше 16 %.

Результати проведених лабораторних досліджень з температурної залежності ПЕО і теплопровідності антрациту та нафтового коксу наведені на рис. 4.4–4.6.

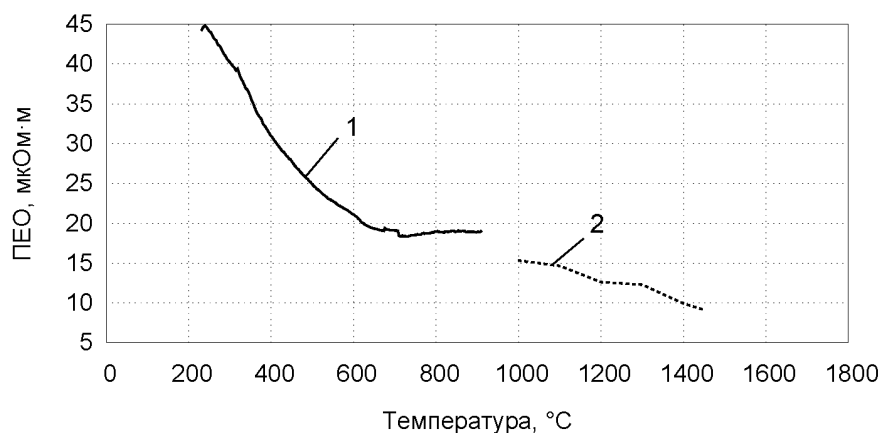


Рис. 4.4. Температурна залежність ПЕО антрациту різного походження: 1 – антрацит ПАТ «Укрграфіт»; 2 – антрацит ЗАТ «Сибирский антрацит» [109]

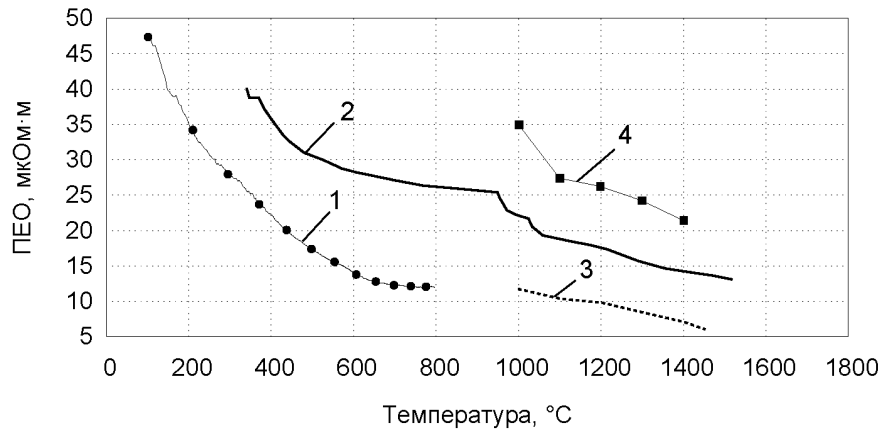


Рис. 4.5. Температурна залежність ПЕО нафтового коксу різного походження:
 1 – нафтовий кокс ПАТ «Укрграфіт»; 2 – нафтовий кокс «Martin Marietta corp.» [109];
 3 – нафтовий кокс «Martin Marietta corp.» після прожарювання за температури 850 °C [109];
 4 – нафтовий кокс «Rain cll» [109]

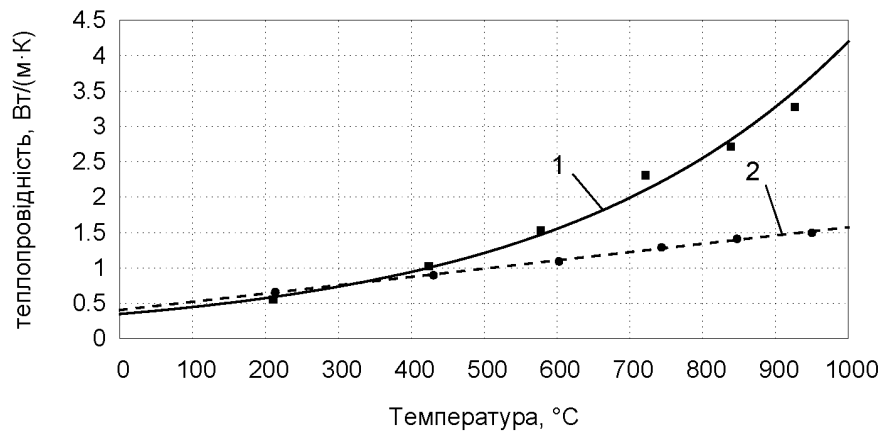


Рис. 4.6. Температурна залежність теплопровідності вуглецевих матеріалів:
 1 – антрацит; 2 – нафтовий кокс

Відомо, що сирий антрацит має велике значення ПЕО, тому для експериментальних досліджень було обрано антрацит, термооброблений за температури 1000 °C, що за своїми фізичними властивостями є більш наближеним до матеріалу, який перебуває в робочому просторі електрокальцинатора.

На основі отриманих та літературних [109] залежностей теплопровідності та ПЕО антрациту і нафтового коксу можна здійснити ініціалізацію властивостей сипучого матеріалу числової моделі з подальшими розрахунками температурних та електричних полів в електрокальцинаторах.

4.2. Експериментальні кампанії високотемпературного оброблення антрациту й нафтового коксу та схеми вимірювань

Відповідно до поставлених завдань розроблено програму експериментальних досліджень на діючому промисловому обладнанні:

- вибір кампаній з термооброблення матеріалів у електрокальцинаторах для проведення досліджень;
- збір даних за геометричними параметрами, технологічними параметрами електричного та допоміжного обладнання, регламентом введення електричної потужності в піч, результатами роботи електрокальцинатора;
- розробка схеми встановлення вимірювальних датчиків;
- розробка методики проведення експериментальних досліджень, що включає вибір датчиків температури, густини теплового потоку, засобів автоматизованого контролю збору даних;
- монтаж вимірювального обладнання;
- проведення експериментальних досліджень;
- аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень.

Відповідно до поставлених завдань і розробленої програми експериментальних досліджень вибрані дві кампанії високотемпературного оброблення вуглецевого наповнювача електродних виробів в електропечі з різними конструктивними параметрами, технологічними регламентами і різним матеріалом, що оброблюється, та розроблено відповідні схеми проведення натурних вимірювань (рис. 4.7, 4.8).

Експериментальна кампанія № 1 прожарювання антрациту в електрокальцинаторі № 1 включала виміри таких електричних та термічних параметрів як електричної потужності, продуктивності, ПЕО_п одержуваного матеріалу, рівня температури (див. рис. 4.7):

- під дросель-шайбою (т. 1, 2);
- у електропровідній частині дросель-шайби (т. 3–8);
- на контакті між неелектропровідною та електропровідною частинами дросель-шайби (т. 9–11, 15–23);
- у неелектропровідній частині дросель-шайби (т. 12, 13, 14);
- над дросель-шайбою (т. 24–31);
- відхідних газів, що утворюються за рахунок згоряння летючих та часткового окиснення матеріалу.

Експериментальна кампанія № 2 високотемпературна обробка нафтового коксу в електрокальцинаторі № 2 включала виміри таких фізичних властивостей, електричних та термічних параметрів як електричної

потужності, продуктивності, ПЕО_п одержаного матеріалу, дійсної густини матеріалу, рівня температур (див. рис. 4.8):

- над дросель-шайбою (т. 1, 2);
- у неелектропровідній частині дросель-шайби (т. 3, 4, 5);
- на контакті між неелектропровідною та електропровідною частинами дросель-шайби (т. 6–17);
- в електропровідній частині дросель-шайби (т. 18, 19, 20);
- під дросель-шайбою (т. 21–28).

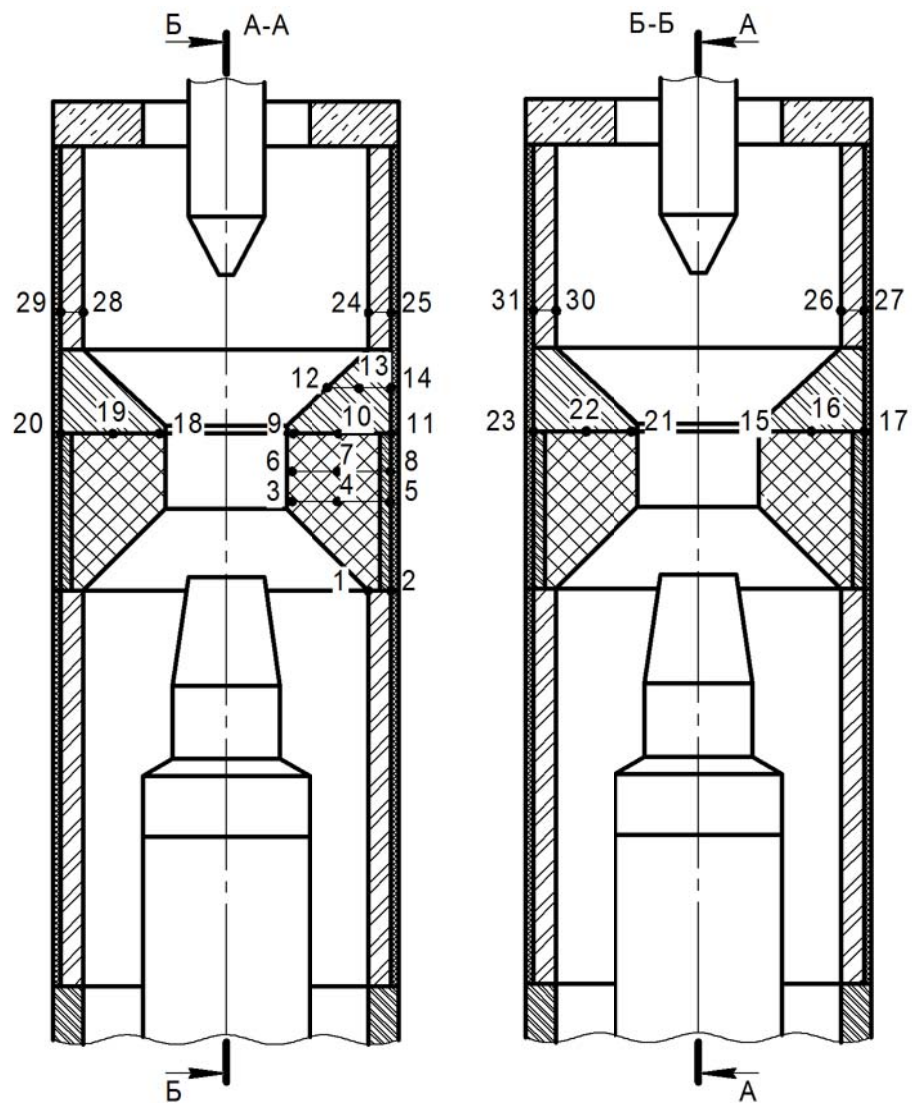


Рис. 4.7. Схема встановлення термометричного обладнання на експериментальній кампанії № 1

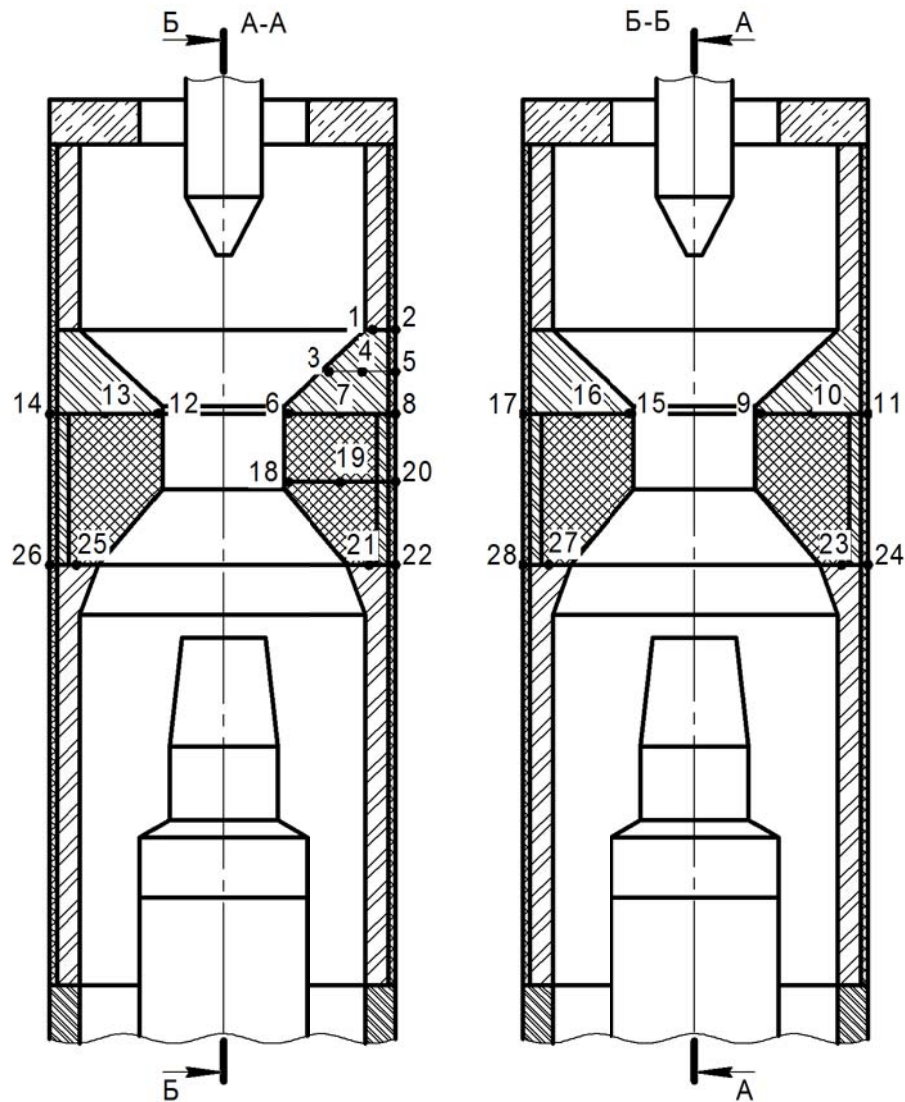


Рис. 4.8. Схема встановлення термометричного обладнання на експериментальній кампанії № 2

4.3. Методика експериментальних досліджень

Під час проведення експериментальних кампаній на електрокальцинаторах № 1 та № 2 для контролю електричних параметрів та продуктивності за готовим продуктом використовувалося штатне вимірювальне обладнання.

Контроль температури футеровки печі біля сталеві обичайки здійснювався штатними термопарами ТХА-201М з робочим діапазоном вимірювання (0–600) °С.

Для проведення динамічних вимірювань температури футеровки печі та дросель-шайби використовувалося таке термометричне обладнання [83, 93–95]:

- термозонди хромель-алюмелеві з діапазоном вимірювання від мінус 50 °С до (1100–1200) °С (короткочасні вимірювання до 1300 °С) (рис. 4.9);
- термозонди вольфрам-ренієві з діапазоном вимірювання від мінус 50 °С до (1500–1600) °С (рис. 4.10);

Для оперативного контролю за температурою на поверхні кожуха електрокальцинатора використовувався термопоінт «Raytek».

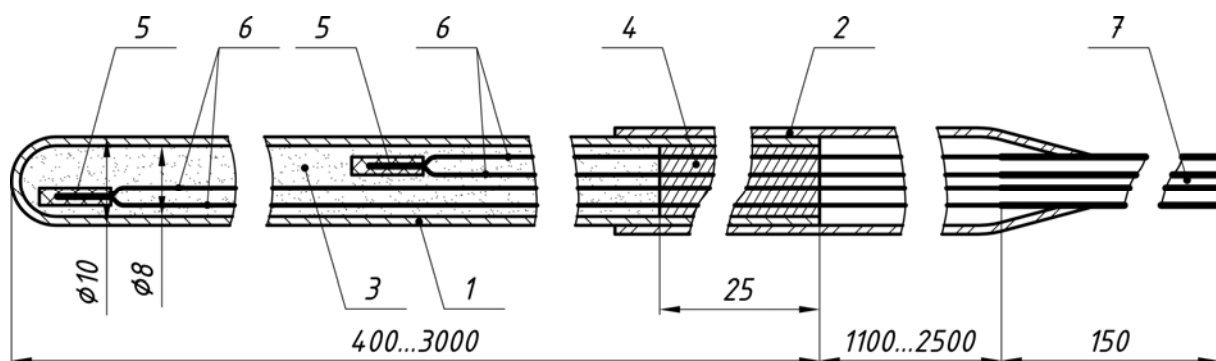


Рис. 4.9. Конструкція хромель-алюмелевого термозонда на дві термопари:

1 – чохол з нержавіючої сталі; 2 – рукав з кремнеорганічної гуми; 3 – оксид магнію; 4 – пробка з оксиду магнію та високотемпературного клею; 5 – гарячі спаї в алундовій одноканальній соломці; 6 – електроди термопар, що електроізолювані мулітокремнеземним сплетінням; 7 – зовнішні кінці термопар під фторопластовою ізоляцією

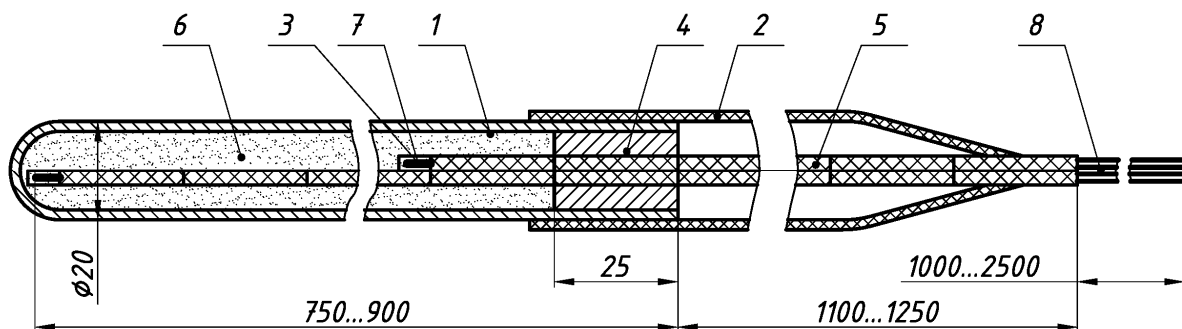


Рис. 4.10. Конструкція вольфрам-ренієвого термозонда на дві термопари:

1 – чохол з нержавіючої сталі; 2 – рукав з кремнеорганічної гуми; 3 – гарячі спаї; 4 – пробка з оксиду магнію і високотемпературного клею; 5 – двоканальна алундова соломка; 6 – оксид магнію; 7 – алундована одноканальна соломка; 8 – зовнішні кінці термопар під фторопластовою ізоляцією

Контроль та збирання даних від термодатчиків проводився за допомогою автоматизованого вимірювального комплексу, який розроблено в НДЦ «РТ» НТУУ «КПІ» [110].

4.4. Результати експериментальних досліджень та їх аналіз

Дані експериментальних досліджень наведені на рис. 4.11–4.18 та в Додатку В, а оцінку похибки експериментальних досліджень приведено в Додатку Г.

Проведений аналіз отриманих даних експериментальної кампанії № 1 дозволив зробити такі висновки:

- загальний час роботи електрокальцинатора становить понад 750 год;
- час виходу електрокальцинатора на усталений режим роботи складає 60 год;
- технологічні параметри усталеного робочого режиму електропечі відповідають таким значенням: падіння напруги на електрокальцинаторі (80–85) В, активна потужність (360–420) кВт, повний електричний опір печі (18–19) мОм, продуктивність за термообробленим антрацитом 720 кг/год (див. рис. 4.11);
- режим розігріву електропечі (або пусковий режим) характеризується поступовим підвищенням активної потужності на кальцинаторі від 200 кВт до робочого значення у 400 кВт. Вивантаження матеріалу розпочато після 12 год роботи зі значенням у 360 кг/год. Поступове підвищення продуктивності печі здійснювалося наступним чином: на 20 год роботи – 480 кг/год, 35 год – 600 кг/год, 80 год – 720 кг/год. Під час простою вивантаження не відбувалося;
- процес оброблення матеріалу в електрокальцинаторі супроводжувався частими відключеннями від мережі електроживлення для проведення додаткових та екстрених технологічних операцій (зокрема, пов'язаних із переміщенням верхнього електроду з метою мінімізації нерівномірності (несиметричності) температурного поля в поперечних січеннях печі), особливо на етапі виведення печі на усталений стаціонарний режим роботи. Так, під час даної кампанії за перші 60 год роботи електропечі її вимкнення відбувалося понад 20 разів. Час простою варіювався від 10 хв до 215 хв, що мало суттєвий вплив на температурний режим роботи електропечі в цілому;
- зміна температури в електрокальцинаторі характеризується значною нерівномірністю в поперечних перерізах, з яскраво вираженим перегрівом окремої сторони електропечі. Так, на рис. 4.12, а та 4.12, б видно, що т. 30, 22 (знаходяться з однієї сторони печі) мають значно вищий темп зростання та фактичні значення температури (т. 22 – 800 °С, в той час як температура в т. 10, 16, 19 становить від 200 °С до 400 °С), упродовж усього етапу розігріву

електрокальцинатора;

– розподіл температури по висоті робочої зони електрокальцинатора (див. рис. 4.12,в), показує низьку температуру над дросель шайбою та високу під нею, що свідчить про те, що основна зона прожарювання матеріалу знаходиться між електропровідною частиною дросель-шайби та нижнім електродом;

– нерівномірність розподілу температури зі сторони футеровки має місце як під час пускового режиму, так і впродовж усієї кампанії (див. рис. 4.13);

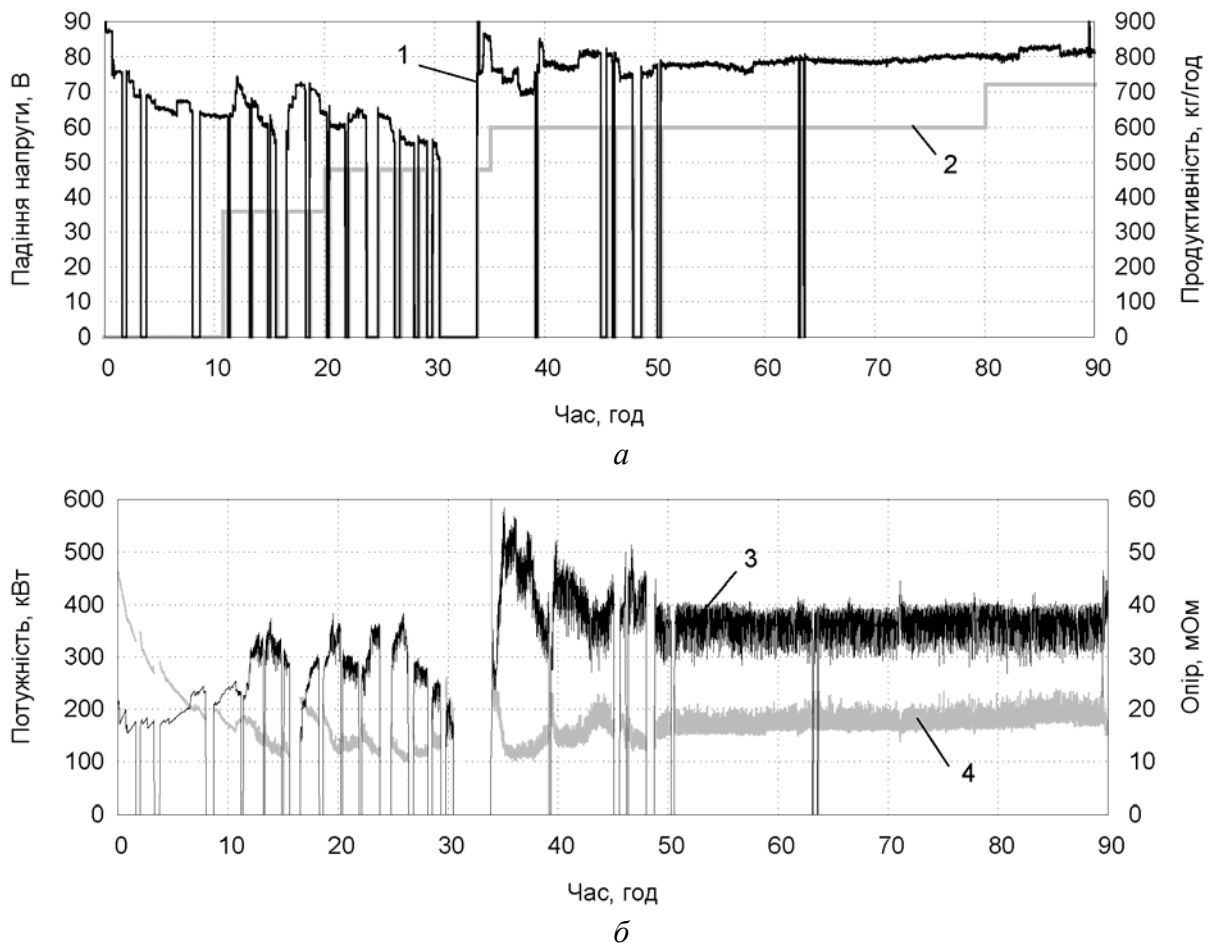


Рис. 4.11. Параметри роботи електрокальцинатора експериментальної кампанії № 1 за період 90 год після пуску:

a – напруга та продуктивність: 1 – падіння напруги на електрокальцинаторі;
2 – продуктивність; *б* – активна діюча потужність та електричний опір: 3 – активна діюча потужність на електрокальцинаторі; 4 – повний електричний опір електрокальцинатора

– на рис. 4.14 показано зіставлення значень PEO_n вихідного матеріалу з загальним електричним опором електрокальцинатора. Упродовж даної кампанії отримувався матеріал з середніми значеннями PEO_n (550–800) мкОм·м. Часті відключення печі від мережі електроживлення

викликають відповідні коливання значень $ПЕО_n$ прожареного матеріалу;

– причиною зупинки електрокальцинатора під час кампанії № 1 є перевищення допустимої температури металевого кожуха печі в зоні, що знаходиться нижче дросель шайби;

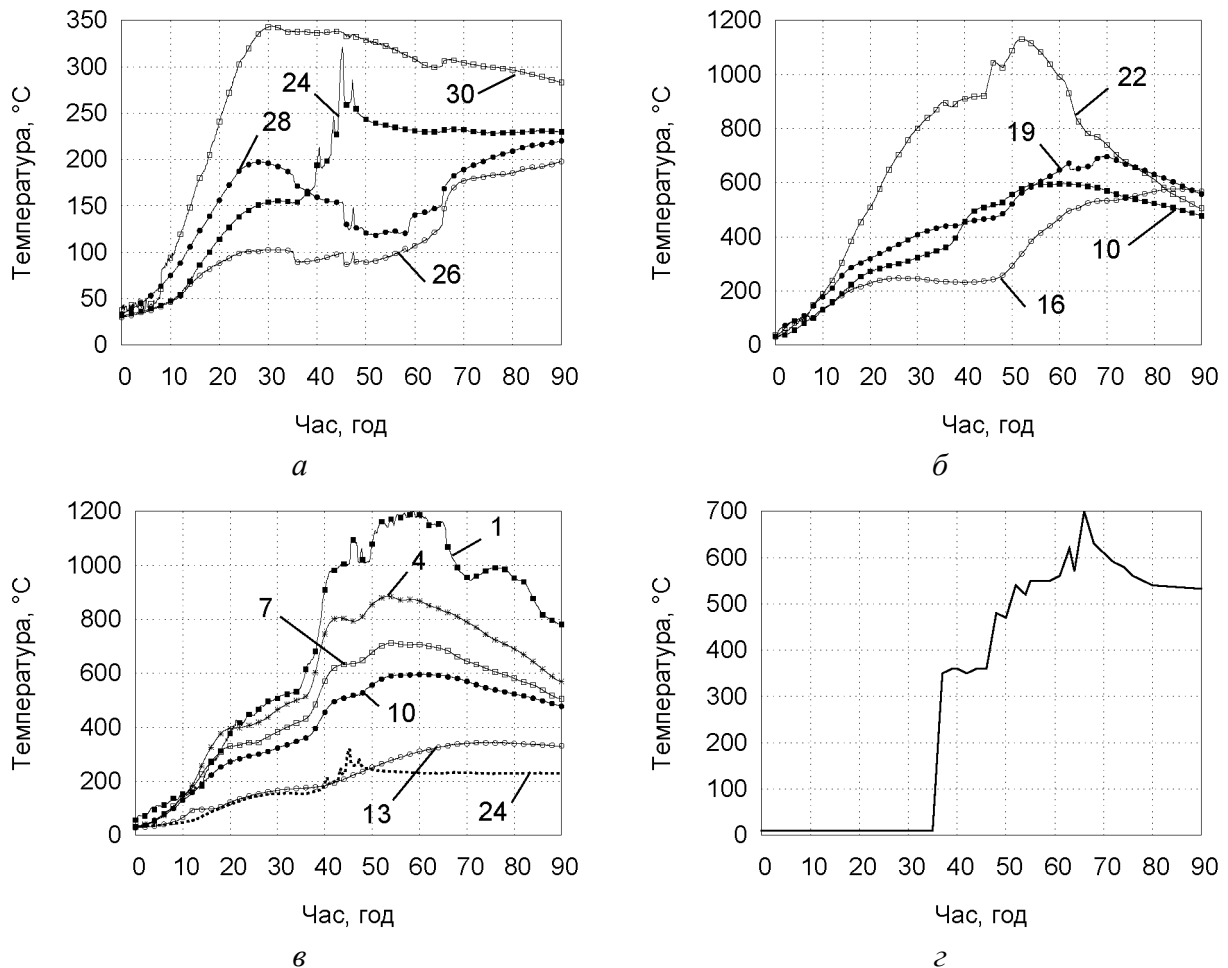


Рис. 4.12. Температури у вимірюваних точках електрокальцинатора експериментальної кампанії № 1 за період 90 год після пуску:

а – розподіл температури над дросель-шайбою (т. 24, 26, 28, 30); *б* – розподіл температури на контакті між неелектропровідною та електропровідною частинами дросель-шайби (т. 10, 16, 19, 22); *в* – розподіл температури по висоті дросель-шайби (т. 24, 13, 10, 7, 4, 1); *г* – температура відхідних газів

– аналіз стану футеровки електрокальцинатора після кампанії № 1 виявив дві зони прогару неелектропровідної частини дросель шайби (див. рис. 4.15, *а* – у зоні зафіксованого перевищення температури т. 22; *б* – у зоні, що знаходиться під газоходом), та прогар футеровки під дросель шайбою.

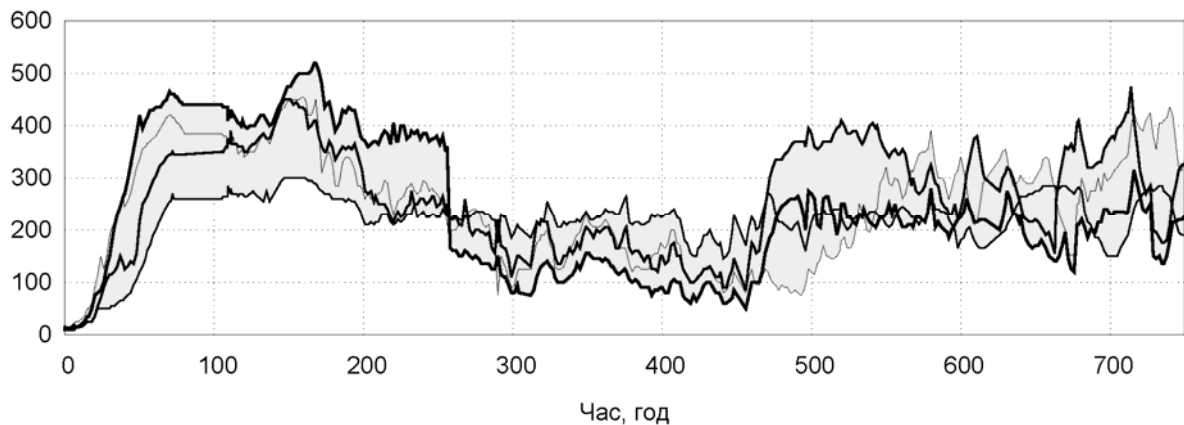


Рис. 4.13. Перепад температури на зовнішній стороні футеровки електрокальцинатора експериментальної кампанії № 1 упродовж усього часу експлуатації

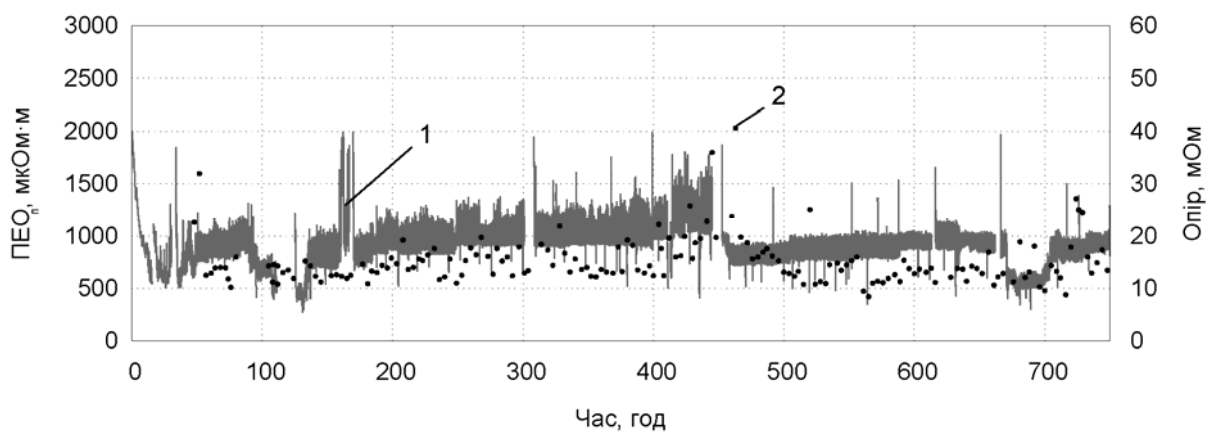


Рис. 4.14. Показники роботи електрокальцинатора експериментальної кампанії № 1 упродовж усього часу експлуатації:

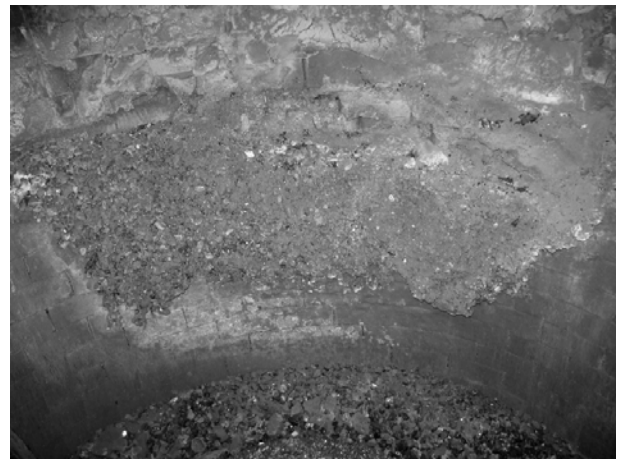
1 – повний електричний опір електрокальцинатора; 2 – ПЕО_п обробленого матеріалу

Аналіз отриманих даних експериментальної кампанії № 2 дає можливість зробити такі висновки:

- загальний час роботи електрокальцинатора складає біля 42 год;
- електрокальцинатор не вийшов на стаціонарний режим роботи у зв'язку з перегрівом вогнетривкої футеровки та аварійної його зупинки;
- технологічні параметри роботи електропечі на кінець експериментальної кампанії становили такі значення: падіння напруги (85–90) В, активна потужність (700–750) кВт, повний електричний опір печі (12–10) мОм, продуктивність 600 кг/год;



a



б

Рис. 4.15. Футеровка електрокальцинатора експериментальної кампанії № 1 після її закінчення та вивантаження антрациту:

a – прогар на не електропровідній частині дросель шайби; *б* – прогар зони під дросель шайбою

– режим розігріву електропечі (див. рис. 4.16) характеризується поступовим підвищенням активної потужності на кальцинаторі від 80 кВт до 850 кВт. Вивантаження матеріалу розпочинається після 12 год його роботи з величиною 360 кг/год. На 13 год відбувається вимкнення подачі електричної потужності у піч, але продуктивність при цьому підвищується до 456 кг/год на період 2,5 год. Після поновлення подачі потужності у піч її продуктивність повертається на рівень 360 кг/год. В період з 16,4 год до 18 год подача електричної потужності та вивантаження не відбуваються. З 20 год по 23 год матеріал також не вивантажується. Починаючи з 27 год продуктивність електрокальцинатора складає 600 кг/год. Починаючи з 37 год активна потужність на електрокальцинаторі становить (700–720) кВт;

– початковий електричний опір електрокальцинатора складає 21,5 мОм і далі на протязі 12 год знижується до значення у 9,7 мОм. З початком вивантажень на 12 год після пуску електрокальцинатора його електричний опір різко спочатку зростає до величини 18,4 мОм, а потім після тимчасового відключення від мережі електроживлення на період з (13–15,4) год знову зростає до 34,6 мОм. Далі упродовж години стабільної роботи електричний опір зменшується до величини 24,5 мОм. За наступні 8 год електричний опір печі знижується до значень 9,3 мОм, що досягнуто на 12 год етапу розігріву без вивантаження матеріалу. Після цього швидкість зміни загального електричного опору системи значно знижується і кампанія закінчується при 8,67 мОм;

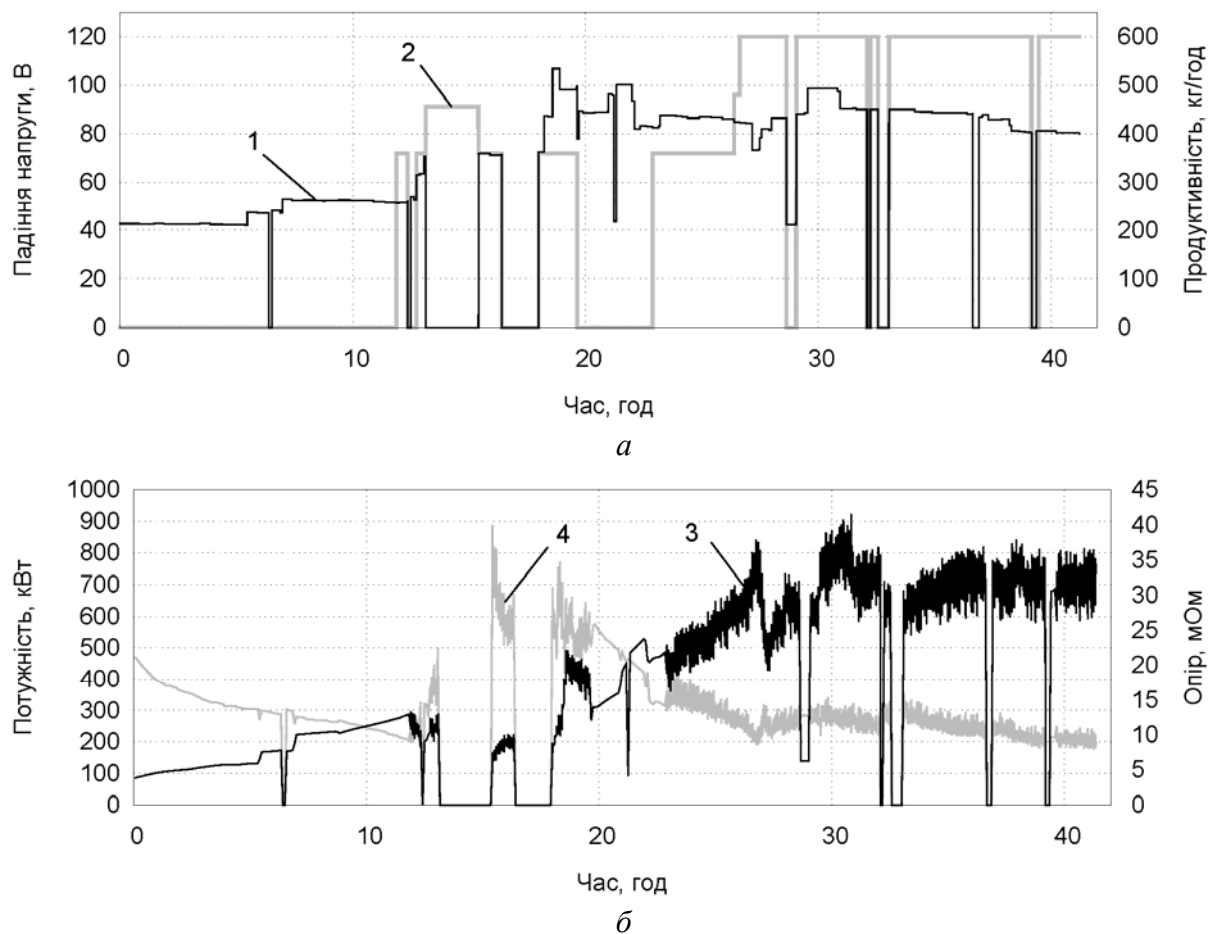


Рис. 4.16. Параметри роботи електрокальцинатора експериментальної кампанії № 2:
 а – напруга та продуктивність: 1 – падіння напруги на електрокальцинаторі;
 2 – продуктивність; б – активна діюча потужність та опір: 3 – активна діюча потужність на
 електрокальцинаторі; 4 – повний опір електрокальцинатора

– розподіл температури в поперечному перерізі електрокальцинатора на контакті між неелектропровідною та електропровідною частинами дросель-шайби характеризується значною нерівномірністю, починаючи з 8 год роботи (див. рис. 4.17). На рис. 4.17,а видно як спочатку перегрів електропечі мав місце у зоні біля т. 9 (див. рис. 4.8). За рахунок виконання коректування положенням верхнього електроду відносно осі робочого простору печі його вдалося змінити майже на протилежний. Температурне поле в електропечі перерозподілилось іншим чином і значний перегрів був зафіксований у зоні біля т. 12, 15, змінити який не вдалося до кінця кампанії;

– зниження температури після 26 год на етапі розігріву електропечі в зонах т. 6, 9 пов'язано з підвищенням продуктивності електрокальцинатора до 600 кг/год;

– після 26 год у поперечному перерізі печі під дросель-шайбою змінюється розподіл температури відносно до перерізу на контакті між

неелектропровідною та електропровідною частинами дросель шайби. При цьому спостерігається значне зростання нерівномірності температурного поля у зоні нижньої кромки конфузору дросель-шайби і в т. 27, 25 відповідно мають місце критично високі темпи росту температури (див. рис. 5.17,б);

– на рис. 4.17,в видно як змінюється температура зі сторони т. 6 по висоті дросель шайби, що характеризує зміну зони прожарювання під час роботи електрокальцинатора. Так, упродовж 26 год роботи основна високотемпературна зона знаходиться на звуженій частині дросель шайби. Після чого, дана зона перерозподіляється рівномірно по усій висоті дросель шайби;

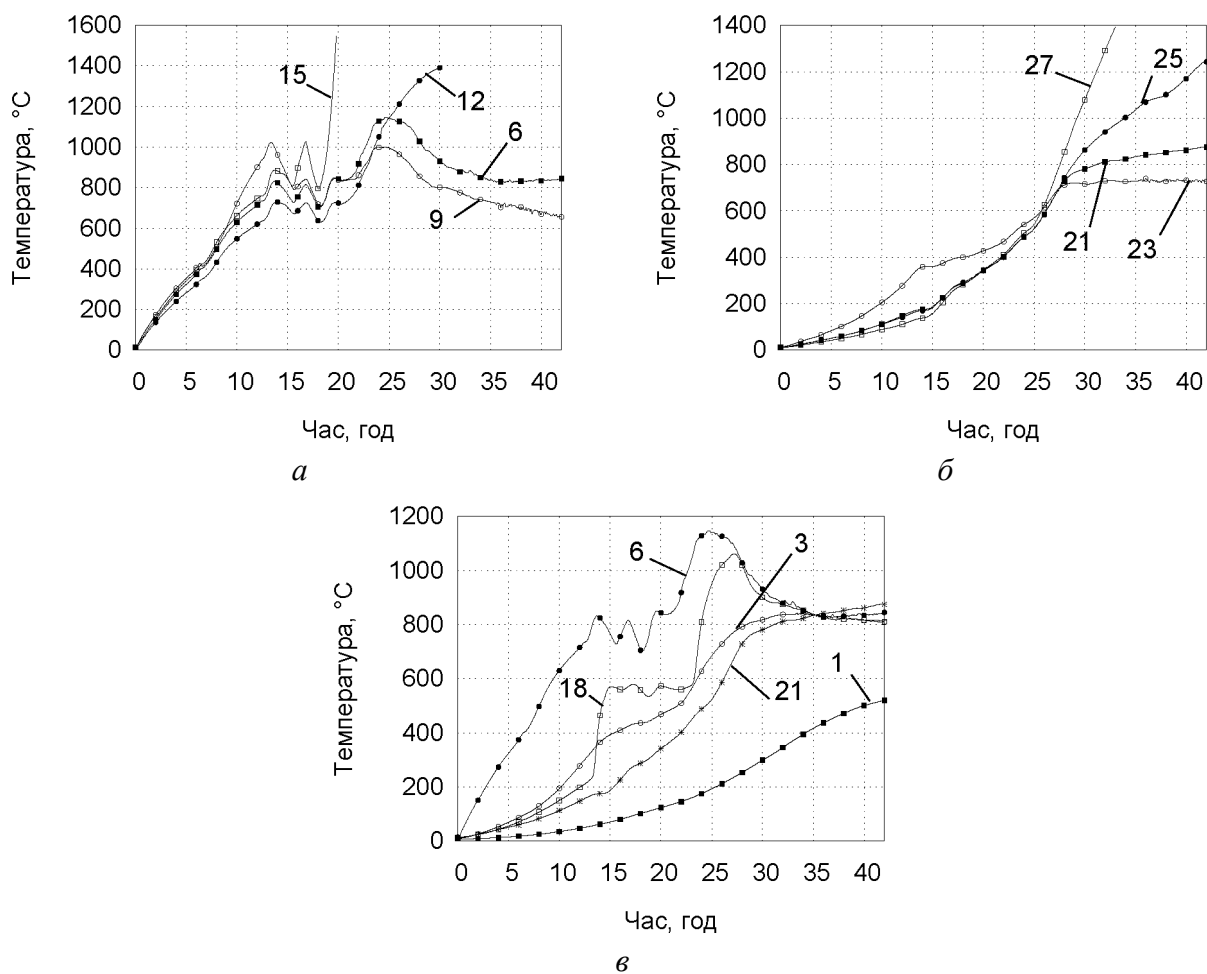


Рис. 4.17. Температура у вимірювальних точках електрокальцинатора експериментальної кампанії № 2:

а – розподіл температури на контакті між неелектропровідною та електропровідною частинами дросель-шайби (т. 6, 9, 12, 15); б – розподіл температури під дросель-шайбою (т. 21, 23, 25, 27); в – розподіл температури по висоті дросель-шайби (т. 1, 3, 6, 18, 21)

– як видно з графіків (див. рис. 4.18), значення ПЕО_п та дійсна густина

нафтового коксу після високотемпературної обробки добре корелюється із загальним електричним опором системи. Тому з'являється можливість для прогнозування якості кінцевого продукту, виходячи з показників загального електричного опору електрокальцинатора.

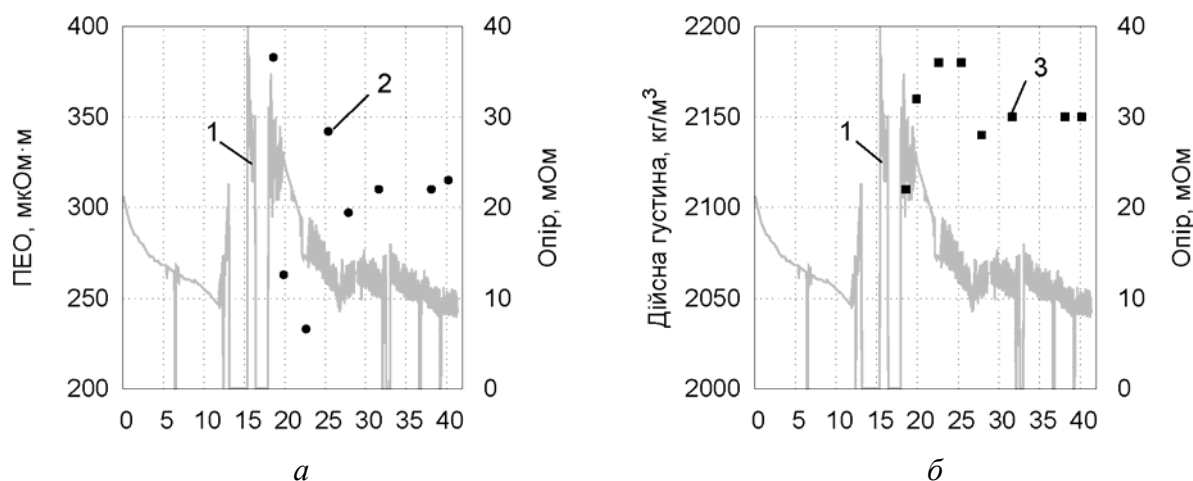


Рис. 4.18. Властивості матеріалу після високотемпературної обробки в електрокальцинаторі, отримані під час експериментальної кампанії № 2:

а – ПЕО_п матеріалу; *б* – дійсна густина матеріалу;

1 – повний електричний опір електрокальцинатора; *2* – ПЕО_п матеріалу; *3* – дійсна густина матеріалу

Приведені вище дві кампанії термічної обробки вуглевмісної сировини в електрокальцинаторі відрізняються як конструктивними, так і технологічними параметрами та фізичними властивостями оброблюваних матеріалів. Тим не менш можна виділити загальні риси в роботі електропечей, в їх теплоелектричному стані та технологічних процесах, що відбувається в них:

- особливістю роботи електрокальцинаторів з дискретними вивантаженнями є постійне коливання діючої активної потужності та загального електричного опору, що корелюється з часом початку вивантаження кожної дози матеріалу, що пройшов термообробку. Так, на початку пускового періоду, коли розвантажування ще не почалося, графік зміни загального електричного опору має яскраво виражений монотонно спадаючий характер (див. рис. 4.11,б, 4.16,б), що пов'язано із наявністю суттєвої температурної залежності ПЕО електропровідних складових конструкції електрокальцинатора і, зокрема, термооброблюваного матеріалу. З початком вивантаження матеріалу, що пройшов через робочий простір електропечі, електричний опір починає різко зростати та згодом приймає характер періодичних коливань, частота та амплітуда яких пов'язана з продуктивністю, тобто з частотою та тривалістю роботи розвантажувального механізму;

- з рис. 4.11, 4.16 видно, як відключення від мережі електроживлення та

простої у роботі механізму вивантаження матеріалу впливають на повний електричний опір електрокальцинатора. Кожен з відмічених технологічних простоїв різко та значно підвищує значення електричного опору печі, майже на 150–200 %. Даний ефект являє собою комбінацію зміни ПЕО матеріалу за рахунок охолодження системи та початку руху сипучого електропровідного середовища, що супроводжується розривом електричних контактів між окремими частинками. Через деякий час матеріал починає рухатися у всьому об'ємі печі і температурна зміна ПЕО вже становить основну частину загальної зміни опору електрокальцинатора.

4.5. Апробація та верифікація числової моделі на даних натурних експериментів

Для апробації розробленої числової моделі фізичних полів високотемпературного оброблення рухомого шару сипучих матеріалів в електрокальцинаторі (див. розд. 2) проведено порівняння отриманих результатів числового моделювання (або числового аналізу) з даними натурних експериментів кампаній прожарювання вуглецевого матеріалу на діючих конструкціях електропечей № 1 та № 2. Зіставлення проводилося за такими електричними параметрами системи як повний електричний опір електрокальцинатора, діюча сила струму та температура в експериментально вимірюваних точках футеровки (див. рис. 4.7, 4.8). Результати порівняння приведені на рис. 4.19, 4.20, 4.22, 4.23 та в Додатку Д.

З приведених результатів зіставлення експериментально отриманих даних та розрахованих з використанням числової моделі за електричними параметрами та температурами у вимірюваних точках футеровки електрокальцинаторів під час кампаній № 1, № 2, видно, що дана числова модель якісно та кількісно описує теплоелектричний стан високотемпературного оброблення рухомого шару різних вуглецевих матеріалів у шахтній електропечі, а саме антрацити і нафтового коксу.

Серед особливостей числової моделі за отриманими результатами зіставлення слід відмітити такі:

- числова модель теплоелектричних процесів в електрокальцинаторі є вісесиметричною, тому вона не може враховувати нерівномірність розподілу електричного струму в об'ємі печі (тобто в азимутальному напрямку), несиметричний каналізований струм, локальні перегріви матеріалу та їх зміну у часі;
- повний електричний опір шахтної печі відтворюється за допомогою числової моделі з похибкою: не більше 10 % – на етапі розігріву, що відповідає пусковому періоду, коли сипучий матеріал не рухається, та не більше 14 % – коли електропіч працює в усталеному режимі, що відповідає

експлуатаційному періоду. Для всіх кампаній характерним є значна розбіжність за значеннями загального електричного опору електрокальцинатора в період (10–17) год з початку вивантаження матеріалу. Даний ефект пов'язаний з комплексом явищ, що не можуть бути враховані у розробленій числовій моделі:

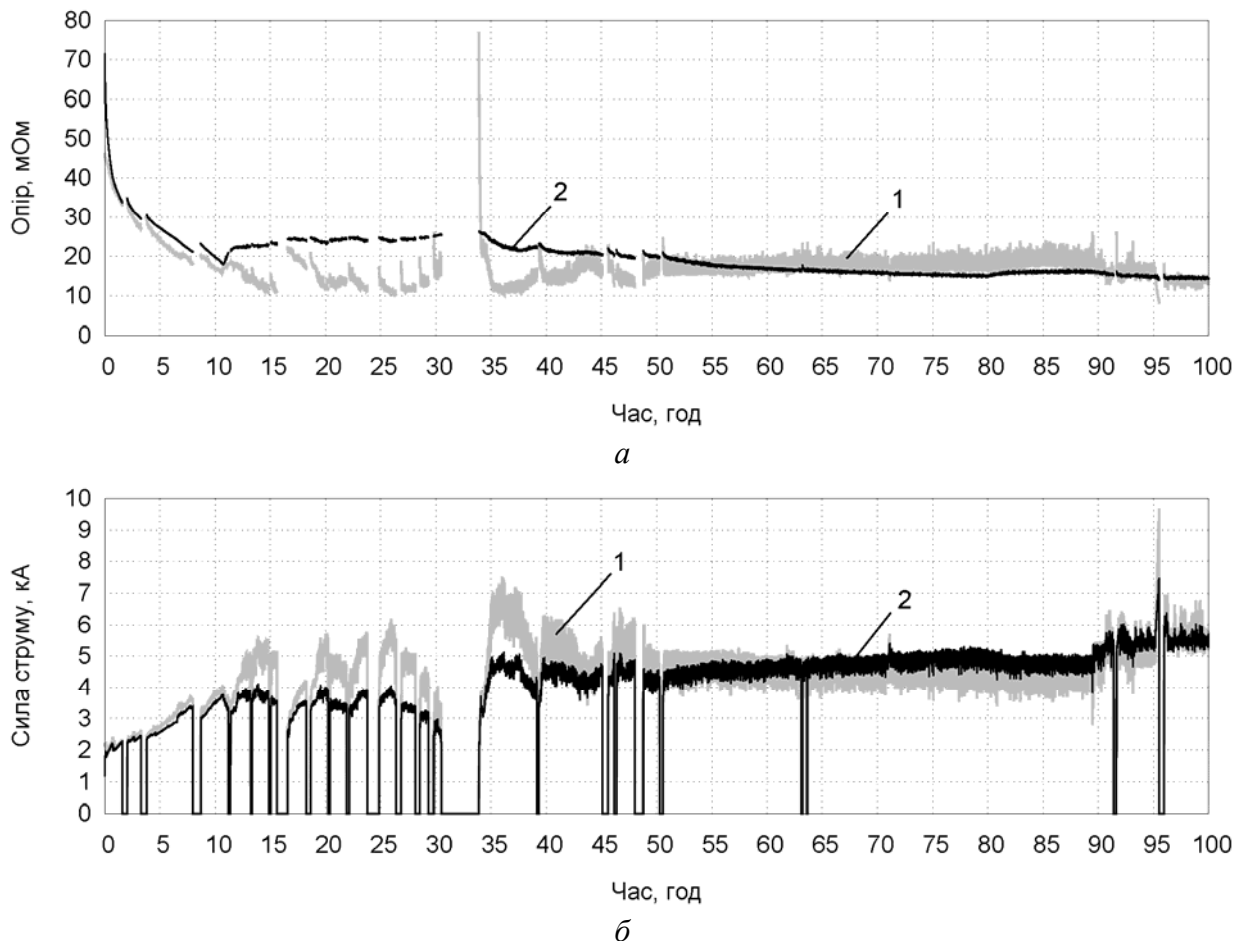


Рис. 4.19. Порівняння експериментально виміряних електричних параметрів кампанії № 1 з даними числового аналізу:

- а* – порівняння значень загального електричного опору електрокальцинатора;
- б* – порівняння значень сили струму на електрокальцинаторі; 1 – експериментальне значення; 2 – значення розраховане з використанням числової моделі

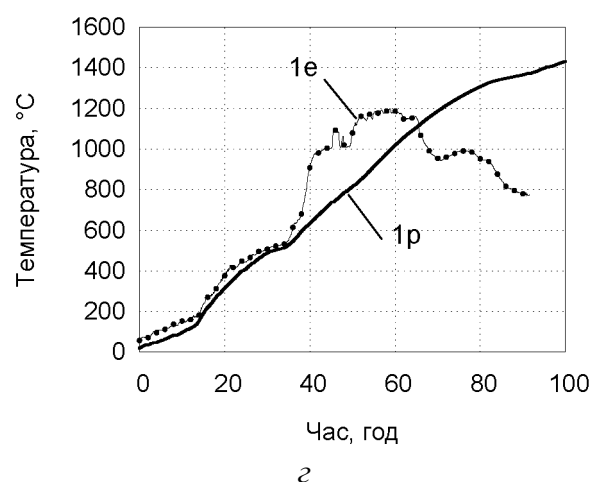
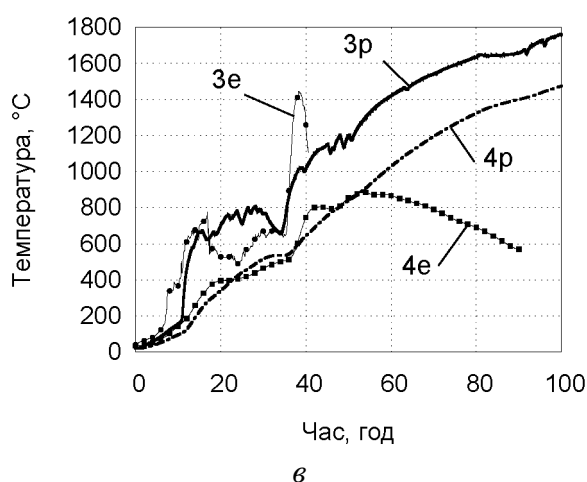
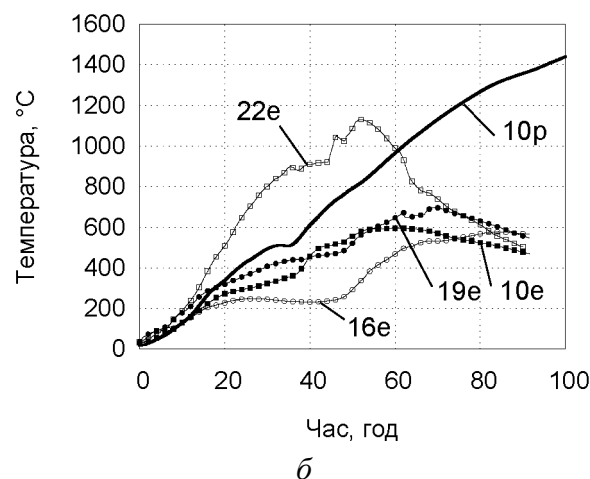
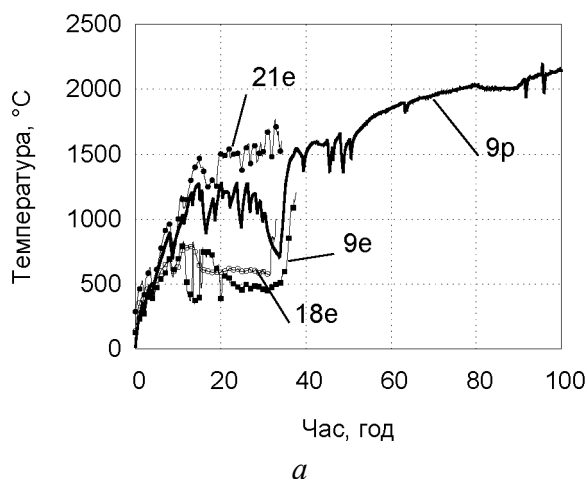


Рис. 4.20. Порівняння експериментально вимірених значень температури кампанії № 1 з даними числового аналізу:

e, p – експериментальні та розрахункові дані, відповідно; 1, 3, 4, 9, 10, 16, 18, 19, 21, 22 – номери точок вимірювання для експериментальної кампанії № 1 (див. рис. 4.7)

- матеріал в електропечі приходить до руху у всьому об'ємі електрокальцинатора лише через деякий час, після початку вивантажень;
- часті відключення від мережі електроживлення, та екстрені технологічні операції, зокрема, переміщення верхнього електроду з метою забезпечення рівномірного температурного поля в горизонтальних січеннях зони прожарювання матеріалу;
- матеріал, що вже пройшов високотемпературну обробку відрізняється від сирого матеріалу температурною залежністю фізичних властивостей. Тому ефективні значення даних фізичних властивостей, що застосовуються у числовій моделі, є характерними для сталого співвідношення сирий/оброблений матеріал, що досягається через деякий час після початку вивантажень;

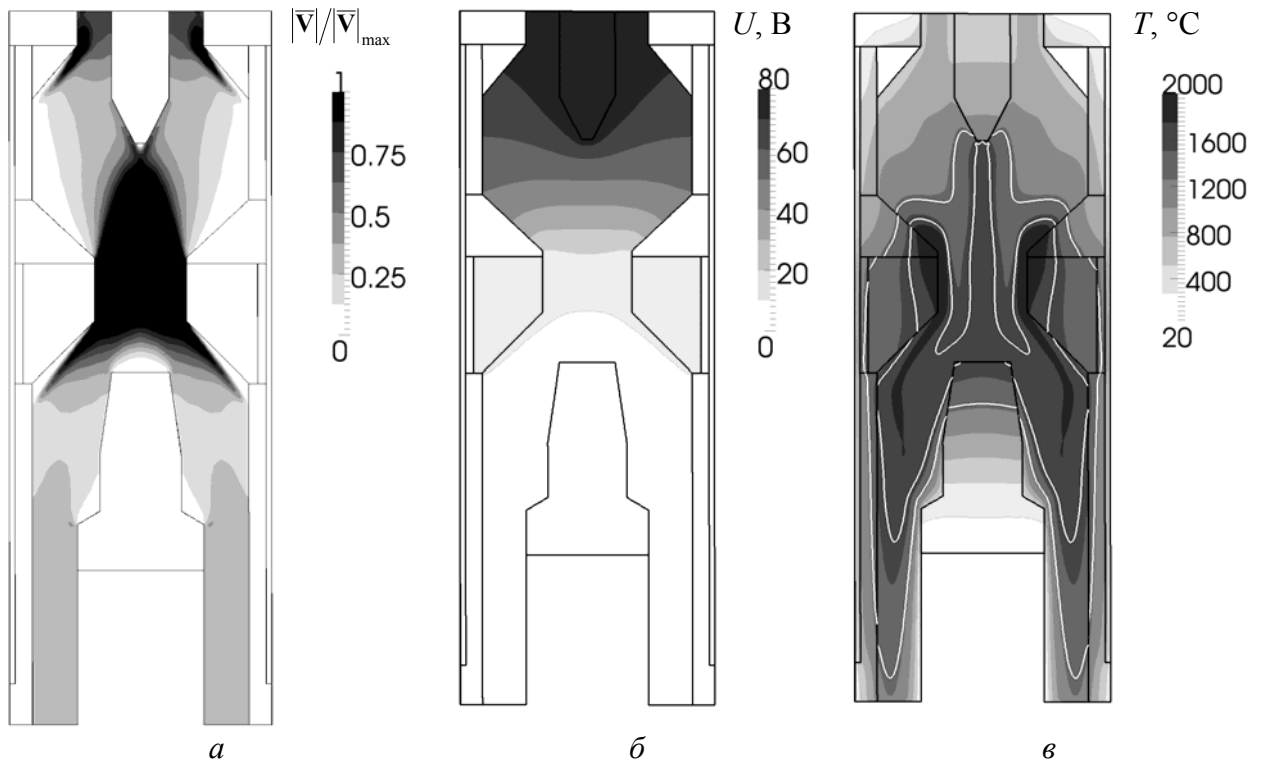


Рис. 4.21. Результати числового аналізу фізичних полів експериментальної кампанії № 1 на 90 год роботи електрокальцинатора:

a – поле безрозмірної швидкості сипучого матеріалу $|\bar{V}|/|\bar{V}|_{\max}$ (\bar{V} – визначається за формулою (2.21), а \bar{V}_{\max} – максимальне значення \bar{V}); *б* – поле електричного потенціалу; *в* – поле температури з ізотермами 1300 °C, 1600 °C

– експериментальні дані показують значні коливання електричних параметрів, що корелюються з вивантаженням кожної дози матеріалу. Коливання значень загального електричного опору електричної печі для обох кампаній знаходяться в межах $\pm 10\%$, що пов'язано як з переносом теплоти рухомим сипучим матеріалом, так і з різкою зміною контактного опору між частинками сировини. Числова модель враховує лише короткочасне охолодження системи за час вивантаження дози, тому коливання опору в числовій моделі електрокальцинатора становить $\pm(3-6)\%$;

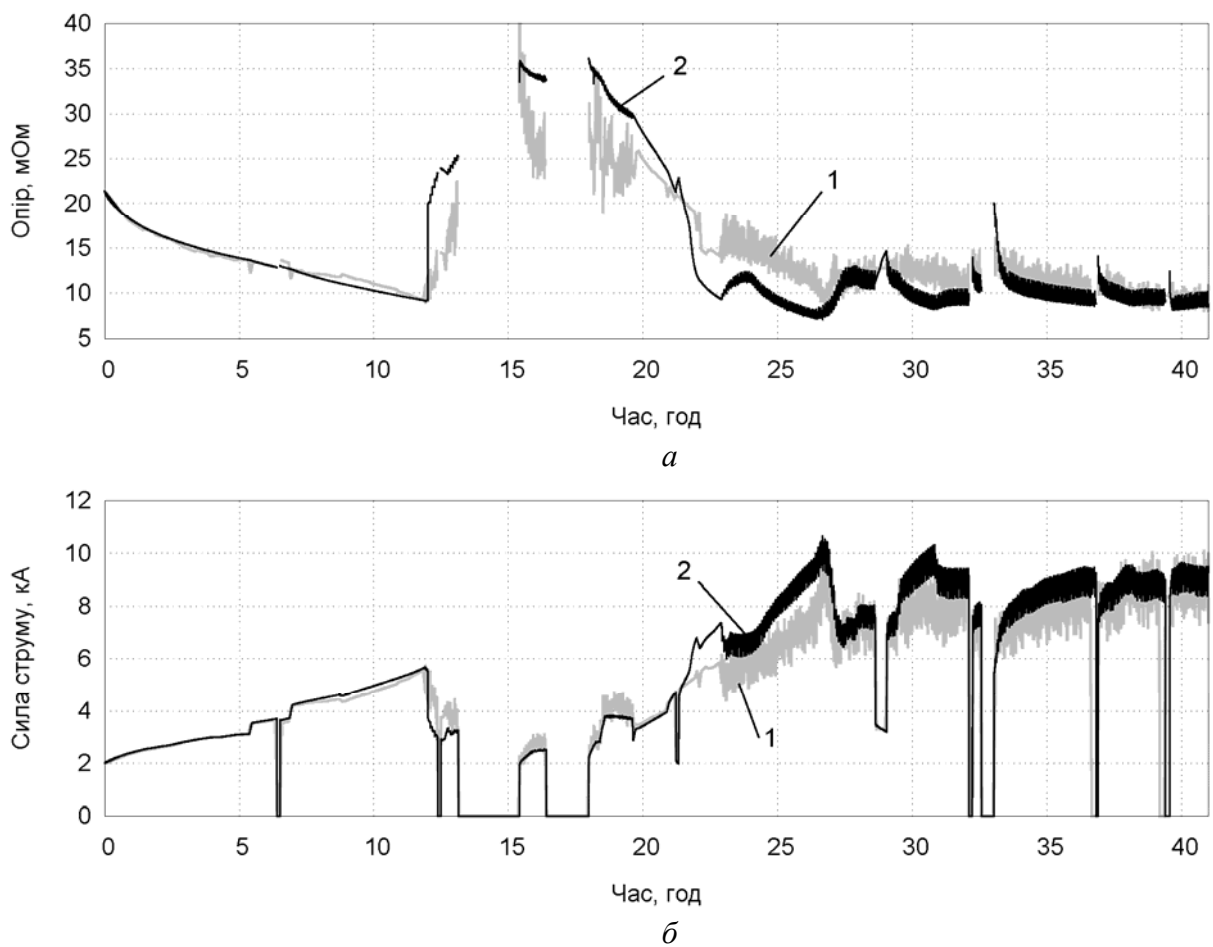
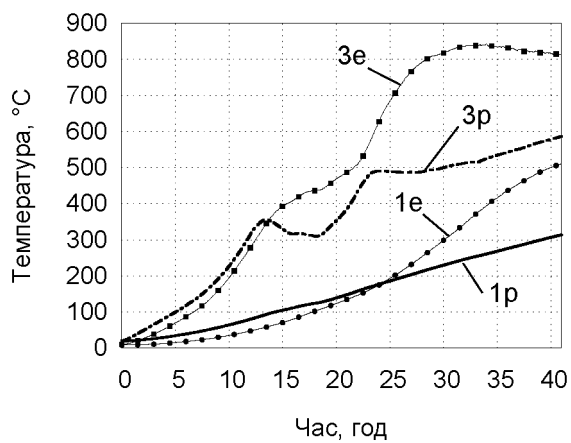
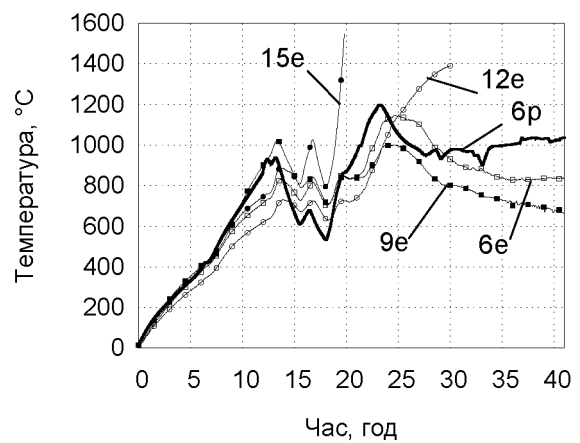


Рис. 4.22. Порівняння експериментально виміряних електричних параметрів кампанії № 2 з даними числового аналізу:

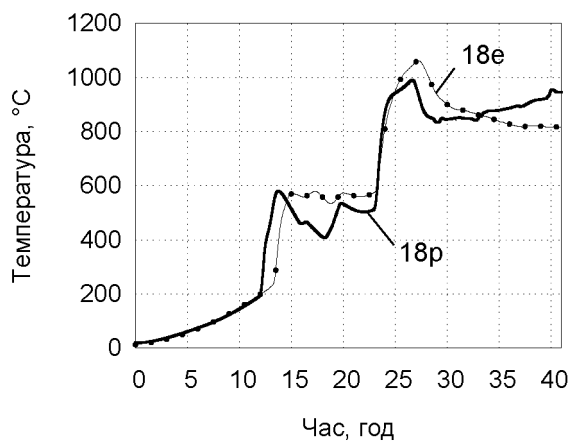
- a* – порівняння значень загального електричного опору електрокальцинатора;
б – порівняння значень сили струму електрокальцинаторі; *1* – експериментальне значення;
2 – значення розраховане з використанням числової моделі



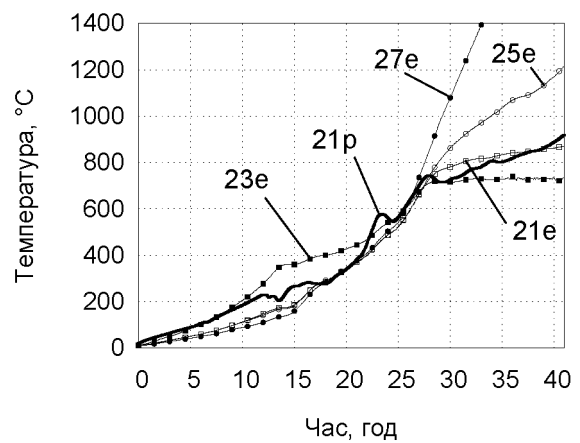
a



б



в



г

Рис. 4.23. Порівняння експериментально вимірянних значень температури кампанії № 2 з даними числового аналізу:

e, p – експериментальні та розрахункові дані, відповідно; 1, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 23, 25, 27 – номери точок вимірювання температури в експериментальній кампанії № 2 (див. рис. 4.8)

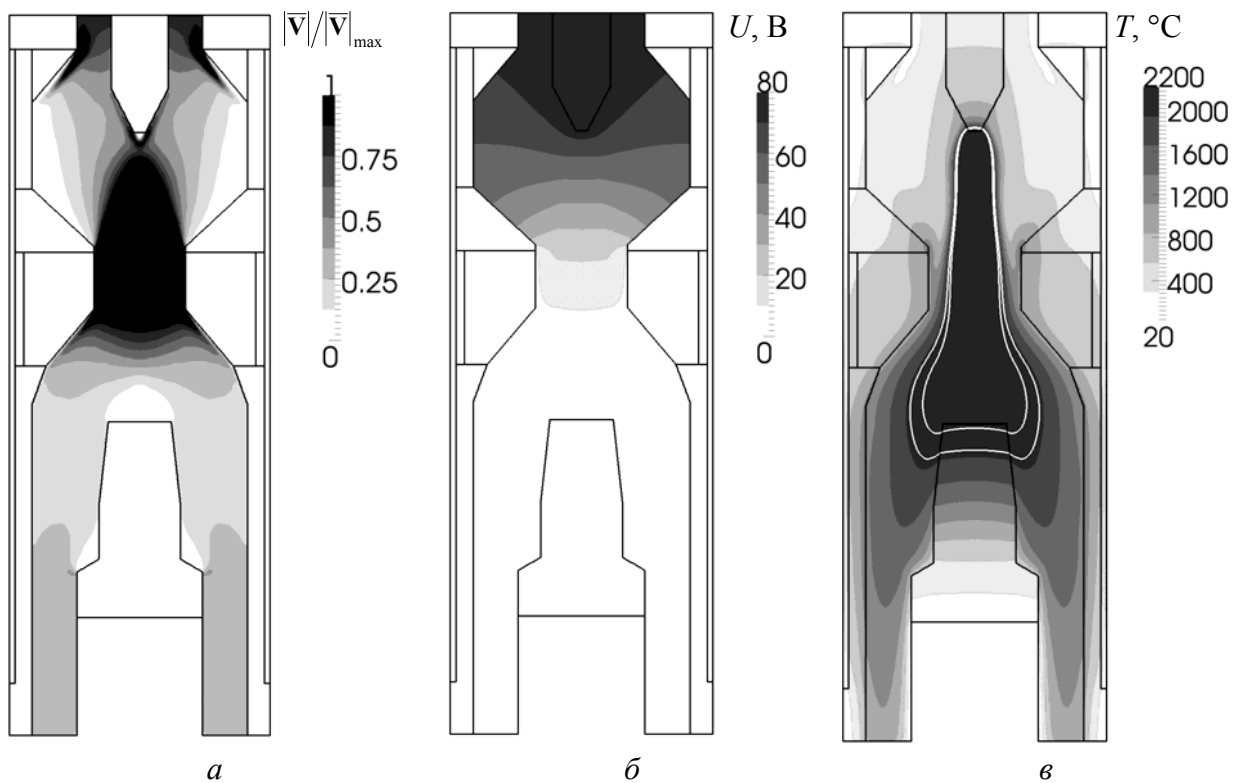


Рис. 4.24. Результати розрахунків експериментальної кампанії № 2 на 42 год роботи електрокальцинатора:

a – поле безрозмірної швидкості сипучого матеріалу $|\bar{V}|/|\bar{V}|_{\max}$ (\bar{V} – визначається за формулою (2.21), а \bar{V}_{\max} – максимальне значення \bar{V}); *б* – поле електричного потенціалу; *в* – поле температури з ізотермами 2000 °C, 2200 °C

– розподіл температури в поперечних перерізах електрокальцинатора має значну несиметричність, що змінюється з часом. Розроблена числова модель адекватно відтворює характер зміни температури у вимірювальних точках та прогнозує їх значення, що знаходяться між зональними мінімумами та максимумами, експериментально виміряних значень температури. Осереднена похибка зіставлення експериментальних та розрахованих значень температури за відсутності локальних перегрівів не перевищує 17 %.

5. ЗАКОНОМІРНОСТІ ПРОЦЕСУ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОБРОБЛЕННЯ РУХОМОГО ШАРУ СИПУЧОГО ВУГЛЕЦЕВОГО МАТЕРІАЛУ В ЕЛЕКТРОКАЛЬЦИНАТОРІ

У монографії закономірності процесу високотемпературного оброблення вуглецевих сипучих матеріалів в електричних печах досліджувались на прикладі експериментальних компаній та числового моделювання прожарювання антрациту та нафтового коксу на існуючих на ПАТ «Укрграфіт» електрокальцинаторах. Також за допомогою числового моделювання розглянуто декілька різних конструкцій даних електропечей, проаналізовано та порівняно основні показники їх роботи. Запропоновано варіанти модернізацій електрокальцинаторів та технологічних режимів роботи, що забезпечать їх ефективність та довговічність. Також розглянуто можливість графітування нафтового коксу в електричних печах безперервної дії.

5.1. Вплив дизайну дросель-шайби на технологічні показники роботи електрокальцинатора

Використання дроселювального пристрою – дросель-шайби в конструкції футеровки електропечі однозначно позитивно позначається на показниках її роботи. Це досягається за рахунок часткового перемішування сипучої сировини при проходженні зони звуження та розширення дроселя, що дає змогу значно знизити радіальний перепад температури в перерізі печі і тим самим знизити нерівномірність теплоелектричних властивостей матеріалу. Наявність дросель-шайби також змінює положення зони у робочому просторі електропечі з найвищою напруженістю електричного поля (зони з максимальним виділенням теплової енергії), що дає можливість уникнути каналізації електричного струму між верхнім та нижнім електродами.

Для визначення впливу різного дизайну дросель-шайби на показники роботи електрокальцинатора проведено серію числових експериментів. Моделювання проводилося за сталих технологічних параметрів: матеріал – антрацит; активна діюча потужність на кальцинаторі – 420 кВт, продуктивність – 700 кг/год. При виконанні числового аналізу досліджувався теплоелектричний стан електрокальцинатора після виходу на усталений режим роботи.

Для проведення аналізу обрано чотири найбільш ймовірні варіанти конструкції дроселюючого пристрою: № 1 – дросель-шайба повністю виконана з вогнетриву; № 2 – верхня частина – вогнетрив, нижня – вугілля;

№ 3 – верхня частина дроселя виконана з вугілля, нижня – вогнетрив; № 4 – дросель-шайба повністю з вугілля (рис. 5.1).

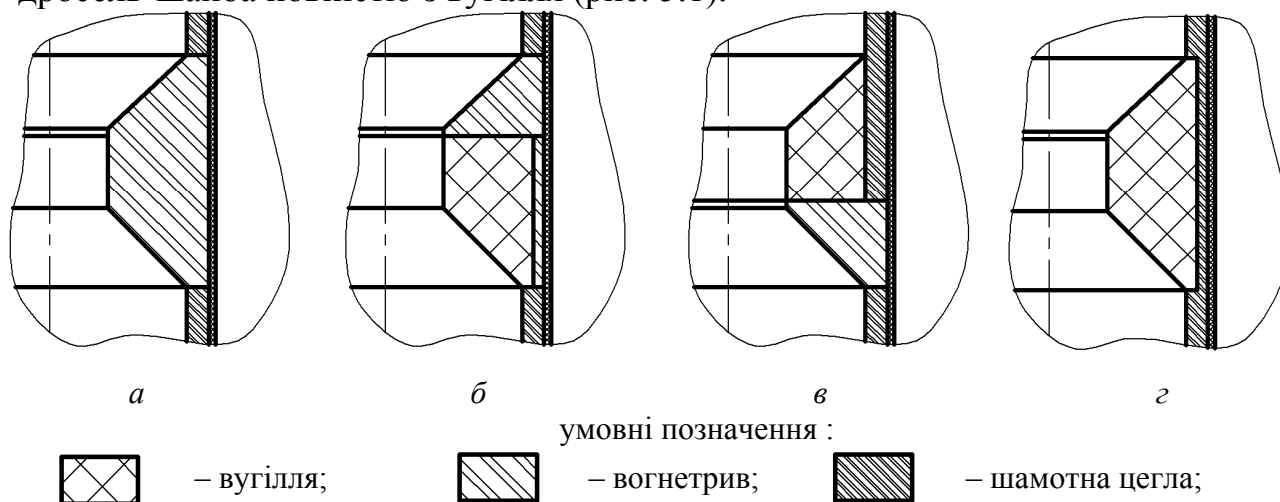


Рис. 5.1. Різний дизайн дросель-шайби:

а – повністю з вогнетриву; б – зверху – вугілля, знизу – вогнетрив; в – зверху – вогнетрив, знизу – вугілля; г – повністю з вугілля;

Результати розрахунків теплоелектричного стану шахтної електропечі при вказаних модифікаціях дросель-шайби наведені на рис. 5.2–5.4.

З приведених результатів видно, що різний дизайн дросель-шайби спричинює відмінні між собою режими роботи електрокальцинатора та відповідний теплоелектричний стан печі, що пояснюється різним розподілом поля електричного потенціалу, лініями току і густиною електричного струму. Основним результатом цього є розташування зон з максимальними значеннями густини джерела теплоти, обумовленими протіканням електричного струму (див. рис. 5.2). Так для дросель-шайби № 1, електричний струм протікає лише між електродами, тому основний нагрів відбувається біля кінчиків електродів та у місці звуження потоку сипучого матеріалу (див. рис. 5.2,а). При наявності в конструкції дросель-шайби електропровідної частини (конструкції № 2, 3, 4), струм буде проходити по траєкторії найменшого опору, тобто від верхнього електрода через електропровідну частину дросель-шайби до нижнього електрода. Тим самим створюючи декілька зон розігрівання матеріалу. Для варіанту № 2 зона основного нагрівання матеріалу проходить між верхнім електродом та дросель-шайбою, для конструкції № 3 – між дросель-шайбою та нижнім електродом, а для конструкції № 4 – біля верхнього електрода та у точках концентрації електричного струму біля електропровідної дросель-шайби.

Для кожного з представлених варіантів на рис. 5.3 наведена ізотерма 1300 °С, що характеризує границі зони прожарювання антрациту. Для дроселя конструкції № 1 – ця зона займає всю нижню частину електрокальцинатора;

для № 2 – майже всю центральну та нижню частини робочого простору електропечі; для № 3 – менш виражено у центрі та внизу електропечі порівняно з варіантом № 2, а також у верхній частині дросель-шайби; для № 4 – виражено верх та низ дросель-шайби, та значна центральна частина.

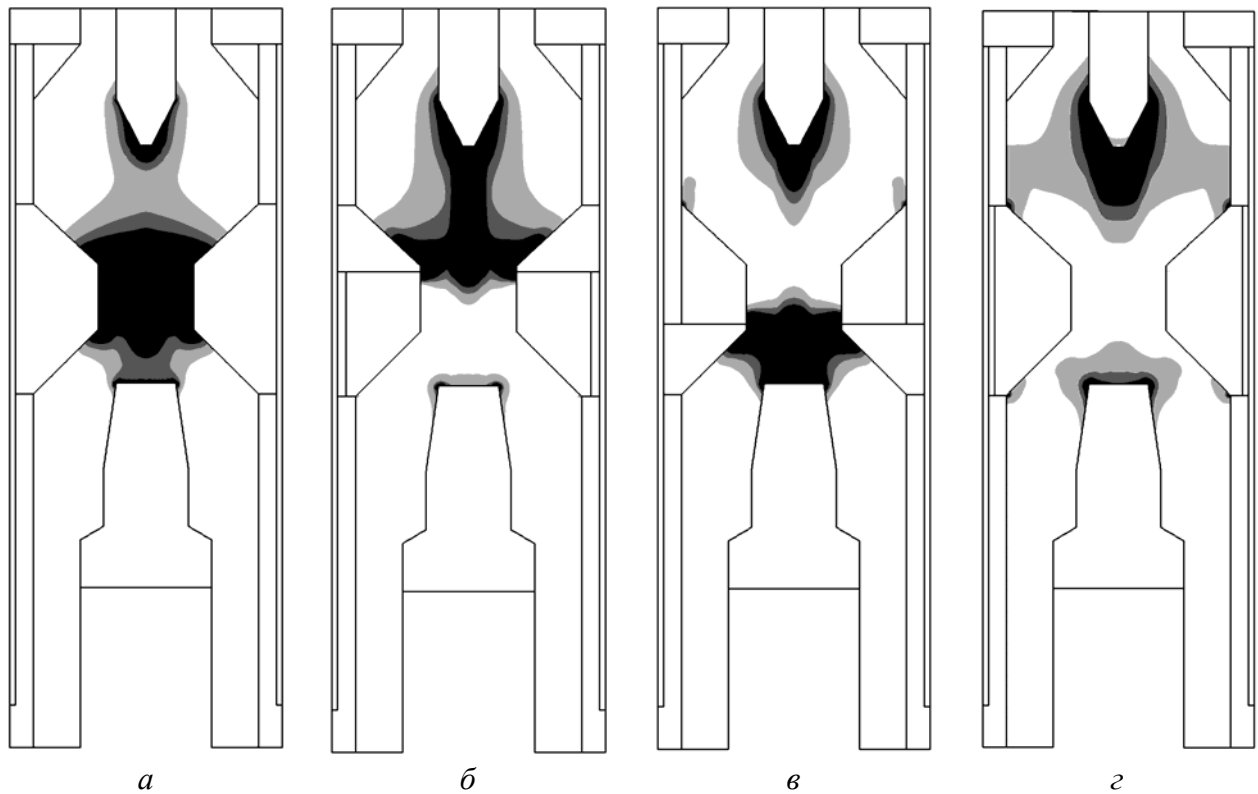


Рис. 5.2. Поля безрозмірної густини джерела теплоти в електрокальцинаторах з дросель-шайбою різних конструкцій:

a – електрокальцинатор з дросель-шайбою № 1; *б* – електрокальцинатор з дросель-шайбою № 2; *в* – електрокальцинатор з дросель-шайбою № 3; *г* – електрокальцинатор з дросель-шайбою № 4

Як показник надійності та довговічності конструкції електрокальцинатора, виступають зони термічних навантажень його футеровки, що приведені на рис. 5.3. На цьому рисунку показано дві ізотерми: 1300 °С – максимальна температура застосування шамотного вогнетриву і 1600 °С – мулітокорундового вогнетриву. З результатів розрахунків видно, що шамотна футеровка печі під дросель-шайбою, отримує найбільше термічне навантаження для всіх варіантів конструкції, окрім № 4. Для конструкції електропечі № 2 ця зона є найменшою, а для варіанту № 3 – найбільшою, до того ж відмічається значний нагрів футеровки над дросель-шайбою. Для конструкції дросель-шайби № 4 є характерним значні термічні навантаження верхньої частини футеровки.

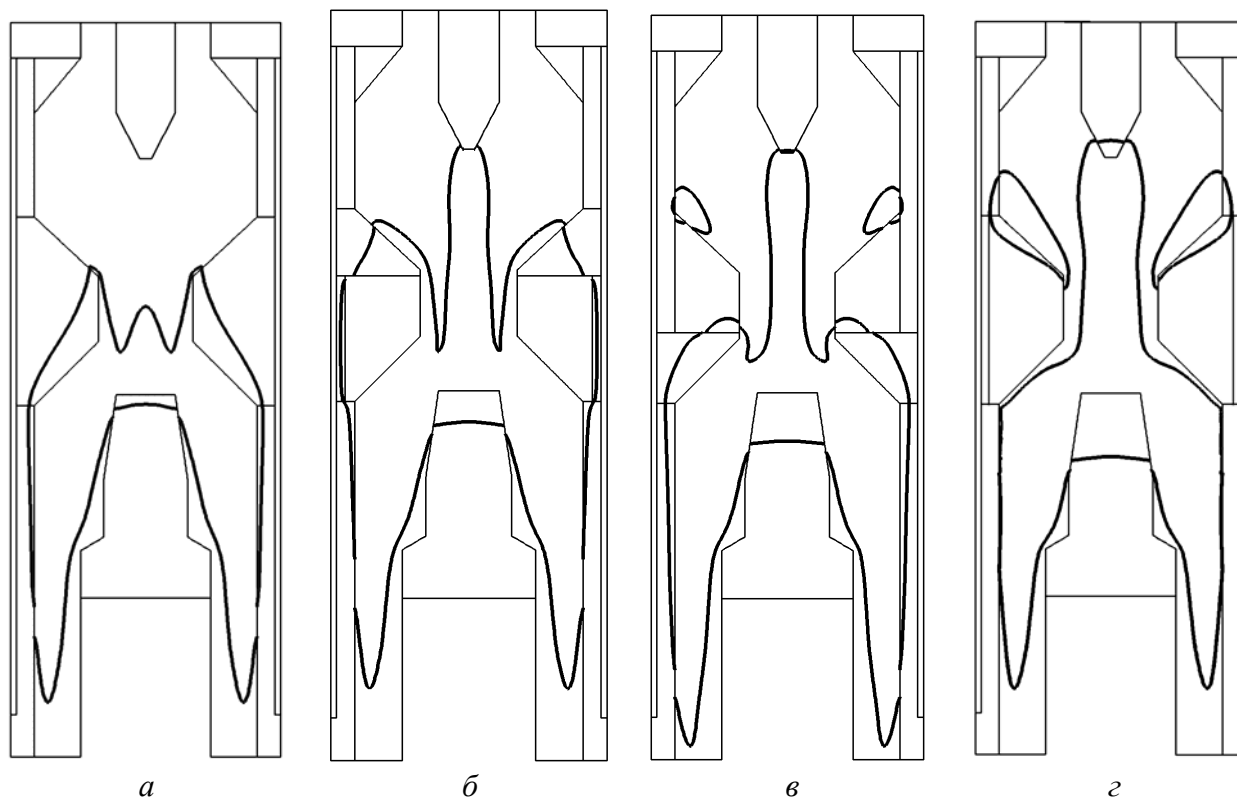


Рис. 5.3. Зони прожарювання антрациту в електрокальцинаторах з дросель-шайбою різних конструкцій:

а – електрокальцинатор з дросель-шайбою № 1; *б* – електрокальцинатор з дросель-шайбою № 2; *в* – електрокальцинатор з дросель-шайбою № 3; *г* – електрокальцинатор з дросель-шайбою № 4; на рисунках показано ізотерму – 1300 °С

У конструкціях № 1, 2, 3 високотемпературний вогнетрив піддається значним термічним навантаженням, що можуть перевищувати його експлуатаційні норми. Слід відмітити, що у конструкціях дросель-шайби № 1 та № 3, перегрівається нижня частина дроселя. З точки зору механічної цілісності конструкції, даний факт є критичним, бо ця частина футеровки сприймає на собі вагу інших частин, тому її перегрів та значне деформування може призвести до руйнування всієї конструкції дросель-шайби. До того ж, з досвіду експлуатації електрокальцинаторів відомо, що у нижньому конусі дроселя утворюється порожнина, що заповнюється летючими. Ці гази мають значний корозійний вплив на конструкційні елементи печі і, тому можуть ще більш послабити міцність, відмічених конструкційних елементів. Для дросель-шайби № 2 корозійний вплив не є значним. З іншого боку, температурні навантаження на конструкцію № 2 більш високі, але вогнетривка частина дросель-шайби не є визначальною, з точки зору механічної міцності футеровки в цілому, порівняно з варіантом № 1. Також з робіт [93] та практичного досвіду експлуатації електрокальцинаторів, відомо, що при механічній взаємодії вуглецевих сипучих матеріалів з вогнетривом, нагрітим

вище температури початку його розм'якшення, буде утворюватися суміш з цих матеріалів, яка за своїми властивостями зможе переносити більш значні термічні навантаження.

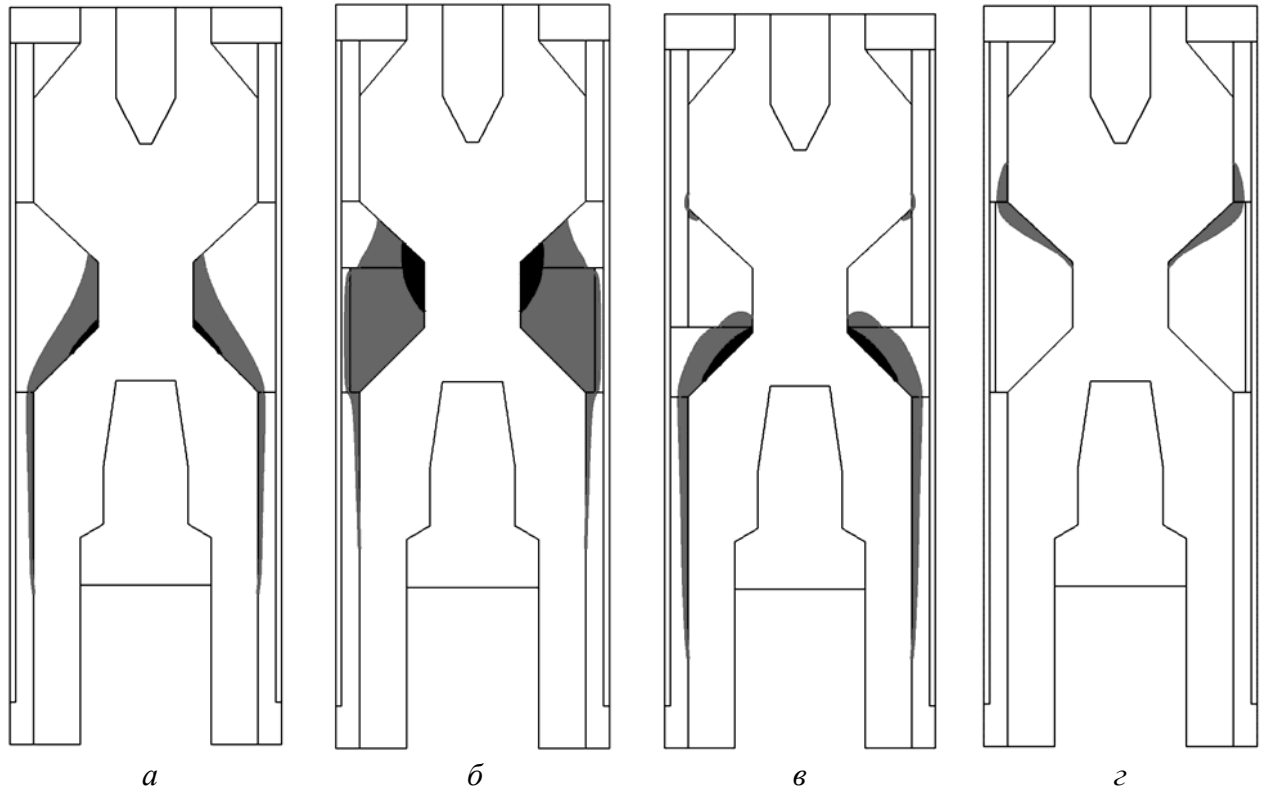


Рис. 5.4. Зони високотемпературних навантажень вогнетривкої футеровки електрокальцинаторів з дросель-шайбою різних конструкцій:
 а – електрокальцинатор з дросель-шайбою № 1; б – електрокальцинатор з дросель-шайбою № 2; в – електрокальцинатор з дросель-шайбою № 3; г – електрокальцинатор з дросель-шайбою № 4; ізотерми – 1300 °С (сіра), 1600 °С (чорна)

Для оцінки працездатності та ефективності роботи кожної конструкції проведено їх порівняння за такими показниками:

- силі струму на електрокальцинаторі – I ;
- коефіцієнту якості прожарювання $C_{\text{пр}}$ – мінімальне значення ПЕО_п матеріалу, отриманого в електрокальцинаторі, що визначене за результатами експериментальних досліджень впливу температури та часу прожарювання антрациту на ПЕОп (див. рис. 4.1), віднесене до регламентованого значення ПЕОп=1000 мкОм·м

$$C_{\text{пр}} = \frac{\text{ПЕО}_{\text{п}}}{1000}; \quad (5.1)$$

- відносному об'ємі небезпечної зони футеровки електропечі з шамотної

цегли, що знаходиться у зоні температур вищих за 1300 °С для верхньої та нижньої частини футеровки: $C_{ш,1}$, $C_{ш,2}$;

- відносному об'ємі небезпечної зони футеровки електропечі з мулітокорундового вогнетриву, що знаходиться у зоні температур вищих за 1600 °С – C_v .

Результати розрахунків вищенаведених показників представленні у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Показники роботи електрокальцинатора з різним дизайном дросель-шайби

Номер конструкції дросель-шайби	I , кА	$C_{пр}$	$C_{ш,1}$	$C_{ш,2}$	C_v
№ 1	4,0	1,0	0,0	0,074	0,005
№ 2	5,9	0,95	0,0	0,025	0,045
№ 3	6,3	0,81	0,003	0,224	0,18
№ 4	8,6	0,99	0,054	0,0	0,0

З таблиці 5.1 видно, що всі розглянуті конструкції дросель-шайби забезпечують мінімально допустимі вимоги для прожарювання антрацити (див підрозділ 4.1). Загалом можна стверджувати, що конструкція дросель-шайби № 2 (верхня частина якої вогнетрив, а нижня – вугілля) має найкращі експлуатаційні характеристики, достатню зону прожарювання термоантрацити та час його перебування при заданій температурі, що забезпечує належну якість кінцевого продукту та надійну роботу електроживильного обладнання у штатних режимах. Тому подальші дослідження впливу геометрії дросель-шайби проводилися саме на цій конструкції.

5.2. Вплив геометричних параметрів дросель-шайби, активної електричної потужності та продуктивності на технологічні показники роботи електрокальцинатора

З результатів числового аналізу теплоелектричного стану обладнання, наведених у підрозділі 5.1, видно, що найбільш перспективною конструкцією дросель-шайби в електрокальцинаторі є конструкція № 2, у якій верхню частину дроселювального пристрою виконано з вогнетриву, а нижню – з вугілля (рис. 5.5).

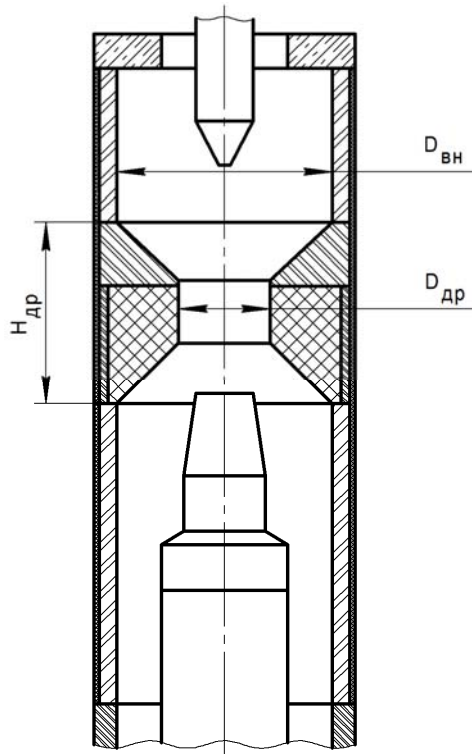


Рис. 5.5. Електрокальцинатор з дросель-шайбою № 2

Для дослідження впливу внутрішнього діаметра дроселювального пристрою на технологічні показники роботи електрокальцинатора (рис. 5.6,а) за змінний параметр приймалося відношення значень внутрішнього діаметра дросель-шайби ($D_{др}$) до діаметра робочого простору електрокальцинатора ($D_{вн}$)

$$\bar{D} = \frac{D_{др}}{D_{вн}}. \quad (5.2)$$

Значення параметра приймаються у діапазоні $\bar{D} = (0,3 - 0,8)$, що обумовлено досвідом експлуатації обладнання. При цьому конструкція дросель-шайби передбачає однакове для всіх випадків положення та габаритну її висоту ($H_{др}$).

Для дослідження впливу габаритних розмірів дросель-шайби на технологічні показники роботи електрокальцинатора (див. рис. 5.6,б) за змінний параметр приймалося відношення значень добутку висоти та товщини дросель-шайби до максимально можливих значень цього добутку (виходячи з габаритних розмірів електропечі)

$$\bar{S} = \frac{H_{др} \delta_{др}}{\max \{H_{др} \delta_{др}\}}. \quad (5.3)$$

де $\delta_{др} = (D_{вн} - D_{др})/2$ – товщина дроселювального пристрою, м; $H_{др}$ – висота дроселювального пристрою, м.

$\bar{S} = 0,1 - 0,5$, виходячи з того, що при $\bar{S} > 0,5$ дросель-шайба має занадто великі габаритні розміри, що унеможливить нормальний рух матеріалу.

Технологічні параметри для числового аналізу використовувалися аналогічно наведеним у підрозділі 5.1.

Вплив активної електричної потужності (див. рис. 5.7,а) досліджувався для інтервалу значень від 350 кВт до 500 кВт, при сталій продуктивності $G = 700$ кг/год. За цей параметр приймалося значення безрозмірної активної електричної потужності

$$\bar{P} = \frac{P - P_{min}}{P_{max} - P_{min}}. \quad (5.4)$$

де $P_{min} = 350$ кВт, $P_{max} = 500$ кВт.

Вплив продуктивності (див. рис. 5.7,б) досліджувався для інтервалу значень від 500 кг/год до 800 кг/год, при сталій активній електричній потужності $P = 420$ кВт. За цей параметр приймалося значення безрозмірної продуктивності

$$\bar{G} = \frac{G - G_{min}}{G_{max} - G_{min}}. \quad (5.5)$$

де $G_{min} = 500$ кг/год, $G_{max} = 800$ кг/год.

Результати, отримані при виконанні числового аналізу, дали можливість визначити залежності технологічних показників електрокальцинатора від геометричних параметрів дроселювального пристрою, активної електричної потужності та продуктивності. А також визначити раціональні значення параметрів, що забезпечують достатню зону прожарювання, допустимі теплові навантаження футеровки печі та роботу електроживильного обладнання у штатних режимах.

Отримані результати представлені у вигляді діаграм, що показують зміну основних технологічних показників залежно від відповідного параметра. При цьому на діаграмах раціональні значення параметрів виділені світло-сірим кольором.

У верхній частині кожної діаграми представлено показник якості кінцевого продукту – $C_{пр}$.

У середній частині кожної діаграми приведені характеристики термічного навантаження футеровки електрокальцинатора: коефіцієнти $C_{ш,1}$, $C_{ш,2}$ та $C_{в}$.

У нижній частині кожної діаграми приведено значення безрозмірної сили струму

$$\bar{I} = \frac{I}{\max\{I\}}. \quad (5.6)$$

Результати параметричного числового аналізу наведені на рис. 5.6, 5.7.

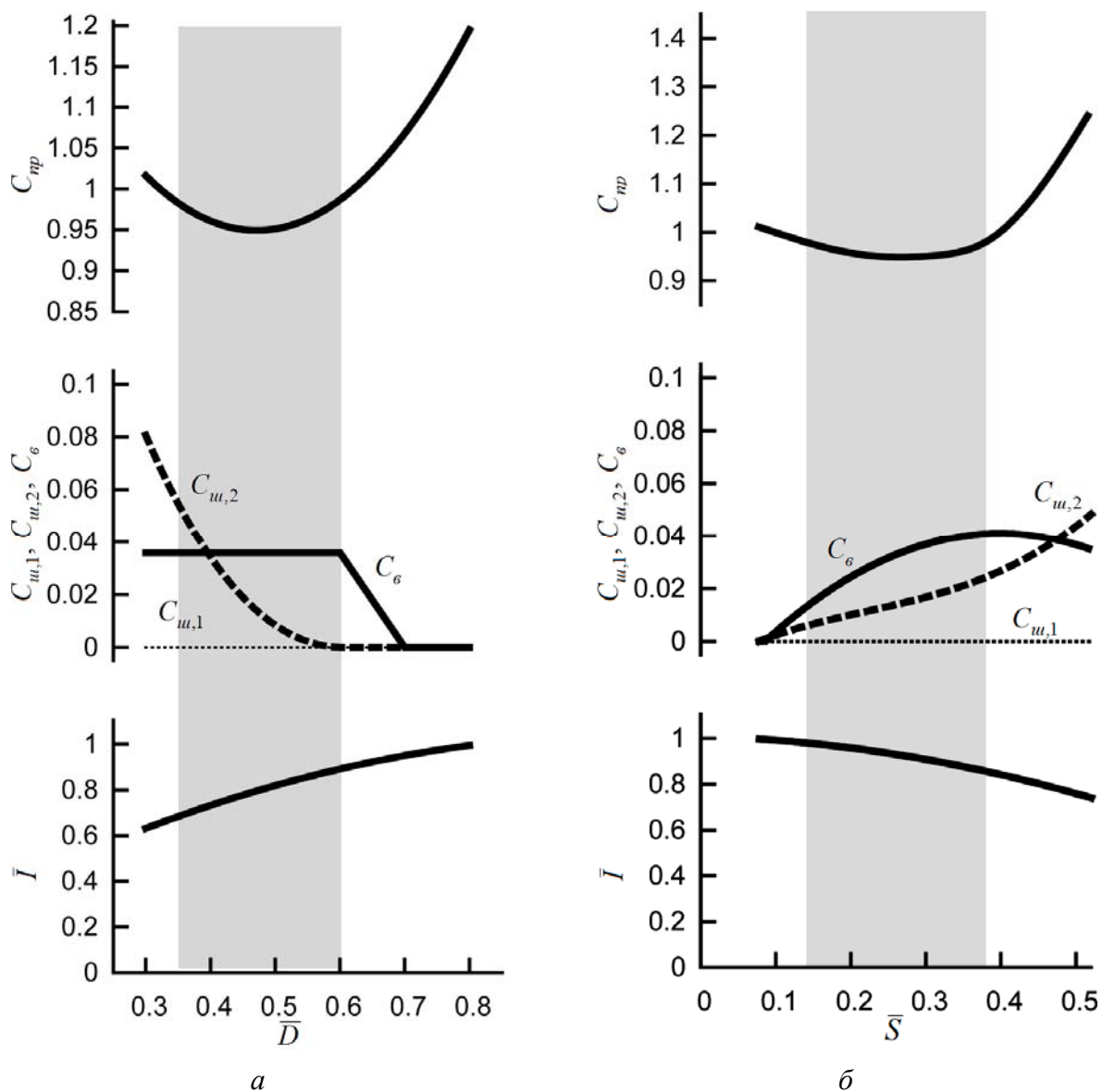


Рис. 5.6. Діаграма залежності технологічних показників роботи електрокальцинатора при різних геометричних параметрах дроселювального пристрою:
 a – діаграма для \bar{D} ; b – діаграма для \bar{S}

Для визначення раціональних значень параметрів \bar{D} , \bar{S} , \bar{P} та \bar{G} прийнято, що основним критерієм є отримання якісного матеріалу, тобто $C_{np} < 1$. Значення допустимих термічних навантажень – $C_{ш,1}$, $C_{ш,2}$, $C_B \leq 0,06$.

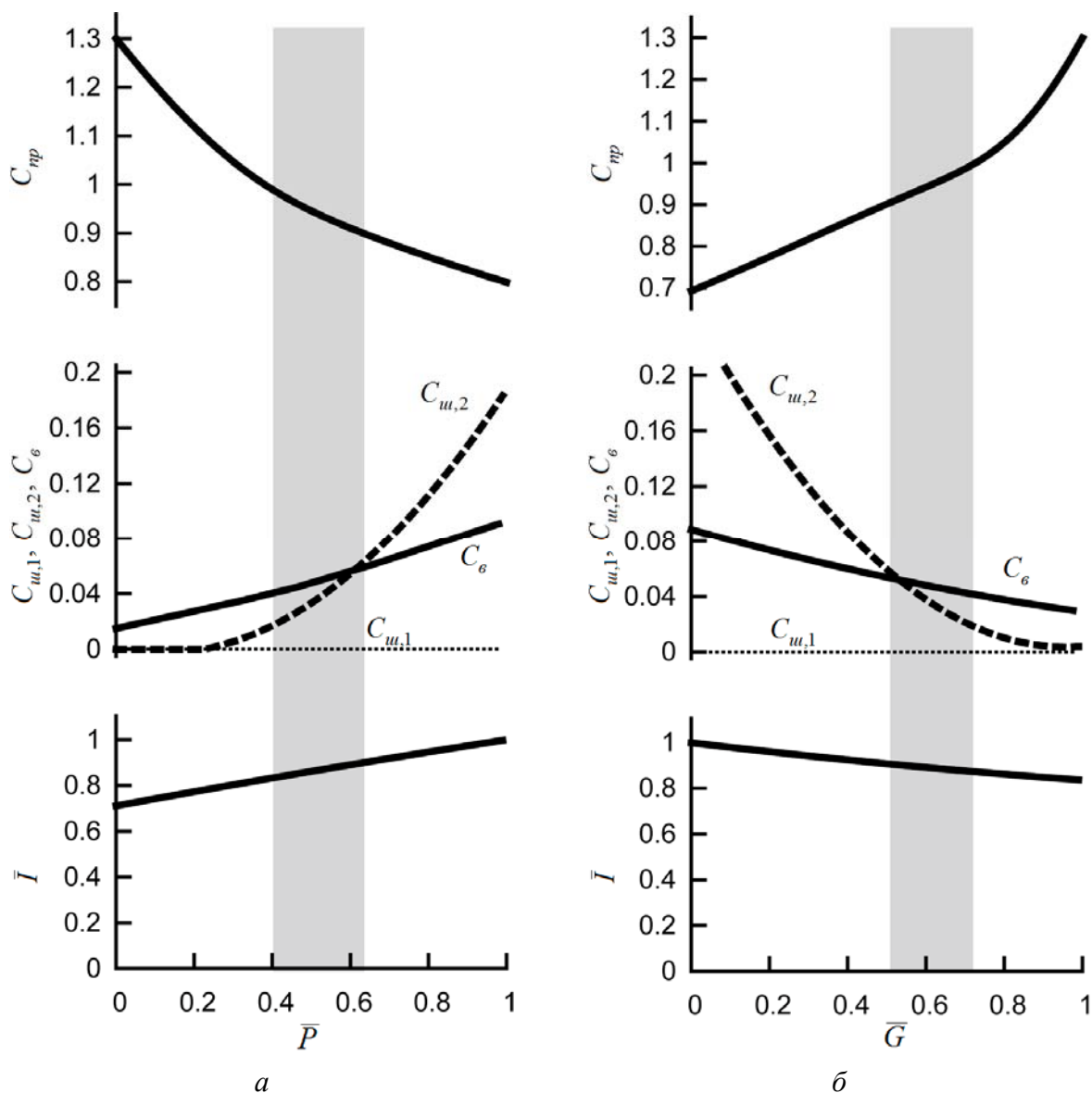


Рис. 5.7. Діаграма залежності технологічних показників роботи електрокальцинатора від активної електричної потужності та продуктивності:

a – діаграма для \bar{P} ; b – діаграма для \bar{G}

З представлених результатів числового моделювання видно, що раціональні параметри при проектуванні електрокальцинатора з дросель-шайбою № 2 будуть такі:

$$\overline{D} = 0,35 - 0,6, \quad (5.7)$$

$$\overline{S} = 0,14 - 0,38, \quad (5.8)$$

$$\overline{P} = 0,4 - 0,62, \quad (5.9)$$

$$\overline{G} = 0,5 - 0,75. \quad (5.10)$$

5.3. Модернізація регламенту пуску та експлуатації електрокальцинатора з дросель-шайбою для прожарювання антрациту

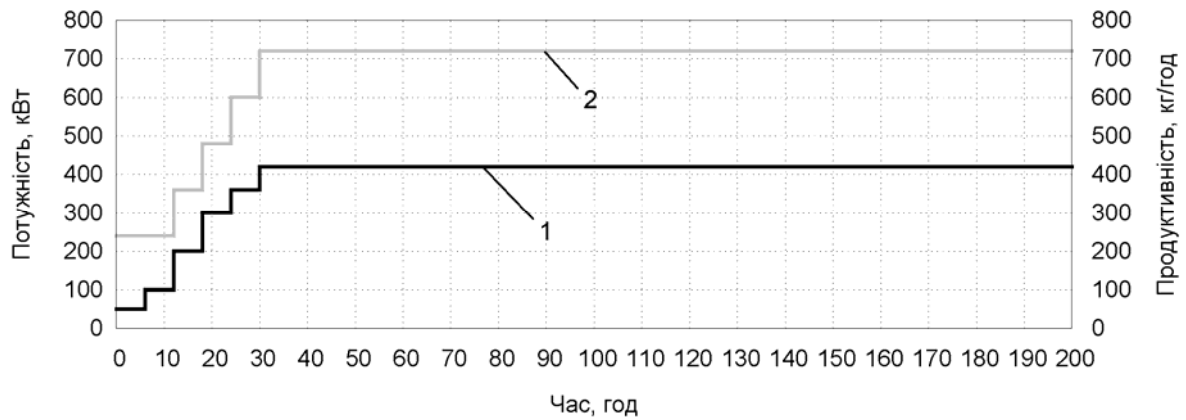
Результати проведених експериментальних досліджень на ПАТ «Укрграфіт» на діючому електрокальцинаторі для прожарювання антрациту (див. підрозд. 4.4), показали наявність недоліків у регламенті його пускового та експлуатаційного режиму:

- тривалий час виходу електрокальцинатора на усталений режим роботи – понад 60 год, а на задану продуктивність – 80 год;
- неконтрольованість процесу розігріву електропечі;
- часті технологічні відключення та тривалі простої в роботі;
- значна несиметричність розподілу температури у поперечних перерізах електрокальцинатора;
- значні термічні навантаження на футеровку печі.

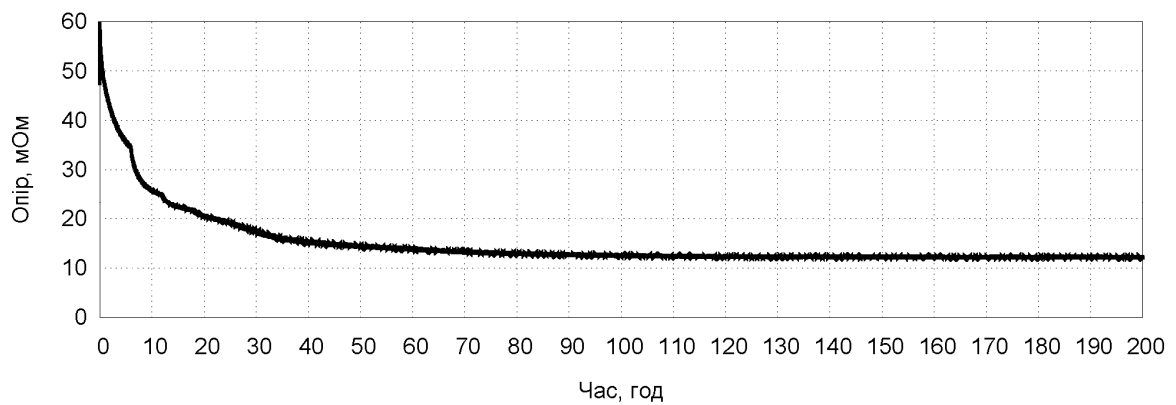
З використанням математичної моделі та інструментів числового аналізу процесу високотемпературного оброблення рухомого шару сипучого матеріалу в електричній печі (див. розд. 2) розроблено модернізований регламент пуску та експлуатації електрокальцинатора для прожарювання антрациту. В основу регламенту покладено такі обмеження режимних параметрів:

- рівномірність зростання темпу підводу електричної потужності;
- початок вивантаження матеріалу розпочинається з моменту пуску електрокальцинатора;
- продуктивність печі підвищується рівномірно, відповідно, з підвищенням електричної потужності;
- вихід на усталений режим роботи здійснюється за 30 год.

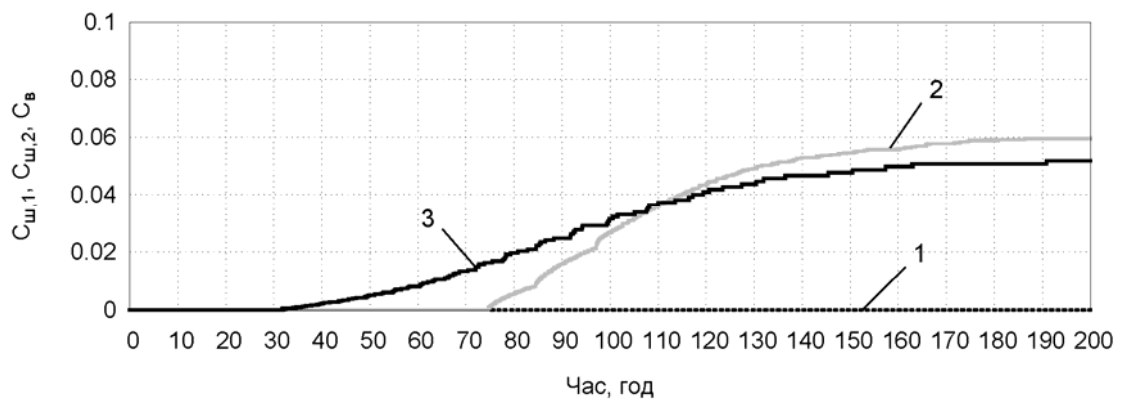
Розроблений регламент пуску та експлуатації електрокальцинатора і технологічні показники його роботи наведено на рис. 5.8.



a



б



в

Рис. 5.8. Модернізований регламент пуску та експлуатації електрокальцинатора для прожарювання антрациту:

a – модернізований регламент пуску та експлуатації електрокальцинатора: 1 – режим підводу активної електричної потужності; 2 – режим зміни продуктивності електрокальцинатора; *б* – повний електричний опір електрокальцинатора; *в* – технологічні показники роботи: 1 – $C_{ш,1}$; 2 – $C_{ш,2}$; 3 – C_v

Запропонований регламент роботи електрокальцинатора впроваджено на ПАТ «Укрграфіт». Дані по проведеній компанії роботи електрокальцинатора наведені на рис. 5.9.

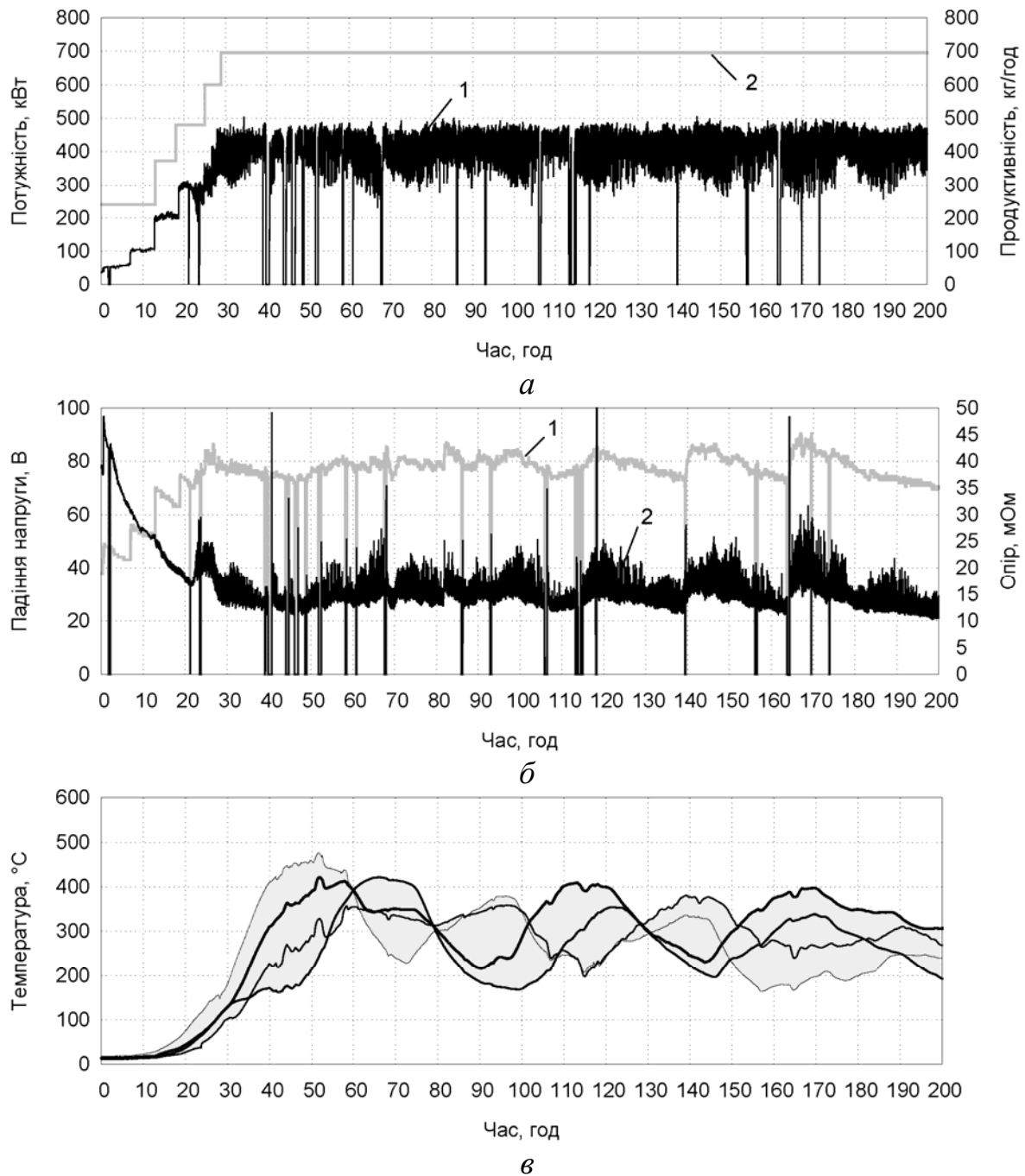


Рис. 5.9. Параметри роботи електрокальцинатора за модернізованим регламентом за період 200 год після пуску:

а – впроваджений режим роботи електрокальцинатора: 1 – активна діюча електрична потужність; 2 – продуктивність електрокальцинатора; *б* – електричні параметри впровадженого режиму: 1 – падіння напруги на електрокальцинаторі; 2 – електричний опір електропечі; *в* – перепад температури на поверхні теплоізоляції електрокальцинатора

У результаті застосування даного регламенту на діючому промисловому обладнанні можна зробити такі висновки:

- модернізований регламент дав змогу запустити та провести компанію високотемпературного оброблення антрациту упродовж 90 днів;
- якість одержуваного прожареного антрациту відповідала заданим вимогам, зокрема, ПЕО_п термообробленого матеріалу не перевищувало 1000 мкОм·м;
- компанія проходила без критичних зупинок та простоїв;
- стан футеровки електрокальцинатора після проведеної компанії – задовільний.

5.4. Модернізація конструкції електрокальцинатора для проведення процесу безперервного графітування нафтового коксу

З результатів проведеного натурного експерименту на електрокальцинаторі для графітування нафтового коксу (див. підрозд. 4.4) видно, що процес графітування вуглецевої сировини може бути проведений в даних електропечах, але при відповідній їх модернізації. Також, зважаючи на результати досліджень із визначення необхідних умов для високотемпературного оброблення нафтового коксу (див. підрозд. 4.1), можна сформулювати такі завдання на розробку:

- забезпечити зони прожарювання з температурою не нижче $T_{\text{пр}} = 2200\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- забезпечити час перебування матеріалу у зоні прожарювання не менш ніж $\tau_{\text{пр}} = 2\text{ год}$;
- зменшити несиметричність розподілу температурного поля у робочому просторі електропечі;
- розробити футеровку електрокальцинатора, що зможе працювати при значних термічних навантаженнях;
- знизити коливання загального електричного опору електропечі, що пов'язані із роботою розвантажувального механізму.

Для вирішення поставлених завдань проведена серія числових експериментів теплоелектричного стану електрокальцинатора для графітування нафтового коксу з використанням різних технічних рішень. В результаті в основу модернізованої конструкції електрокальцинатора було покладено такі технічні рішення:

1. Бічний секційний струмовідвід, що складається з 4 додаткових електродів прямокутного перерізу, які під'єднано до електропровідної частини футеровки печі, замінює нижній електрод.

2. Дроселювальний пристрій з $\bar{D} > 0,7$, виконано повністю з електропровідного матеріалу, який дозволить організувати рівномірний рух сировини у робочому просторі печі, що сконцентрує зону прожарювання в середині електрокальцинатора.

3. Безперервне вивантаження матеріалу дасть змогу уникнути коливань електричних параметрів роботи електрокальцинатора та зменшити імовірність різких стрибків електричного опору, що пов'язані з нерівномірним рухом сировини.

4. Футеровка електрокальцинатора має бути виконана з різних вогнетривких матеріалів з різною температурою застосування, залежно від рівня термічних навантажень в окремих її зонах.

В результаті проведеної серії числових експериментів була розроблена конструкція електрокальцинатора (рис. 5.10, 5.11), що дає можливість проводити безперервне графітування нафтового коксу.

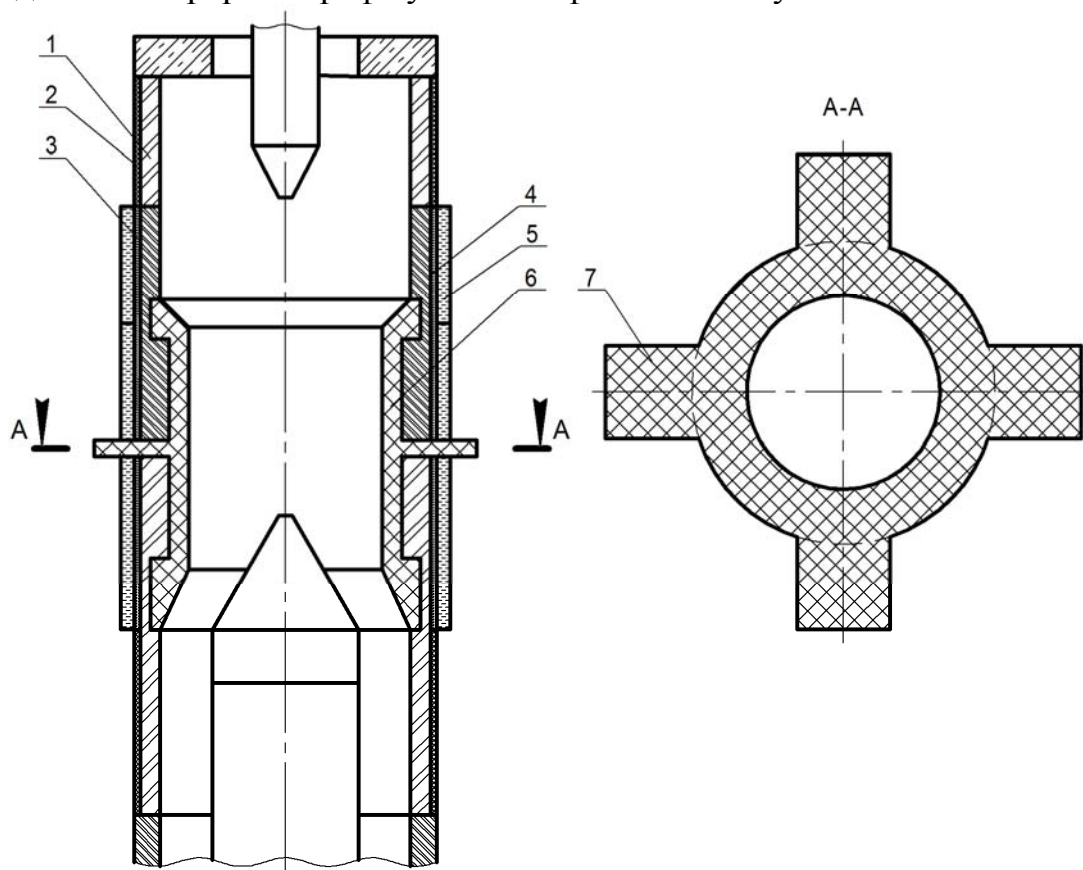


Рис. 5.10. Модернізована конструкція футеровки електрокальцинатора для безперервного графітування нафтового коксу:

- 1 – шамотна цегла; 2 – теплоізоляційний мулітокремнеземистий фетр;
 3 – високотемпературний вогнетрив з температурою застосування понад 1900 °С;
 4 – шамотна крупка; 5 – водяне охолодження; 6 – вугільна футеровка; 7 – бічний секційний струмовідвід з 4 додатковими електродами

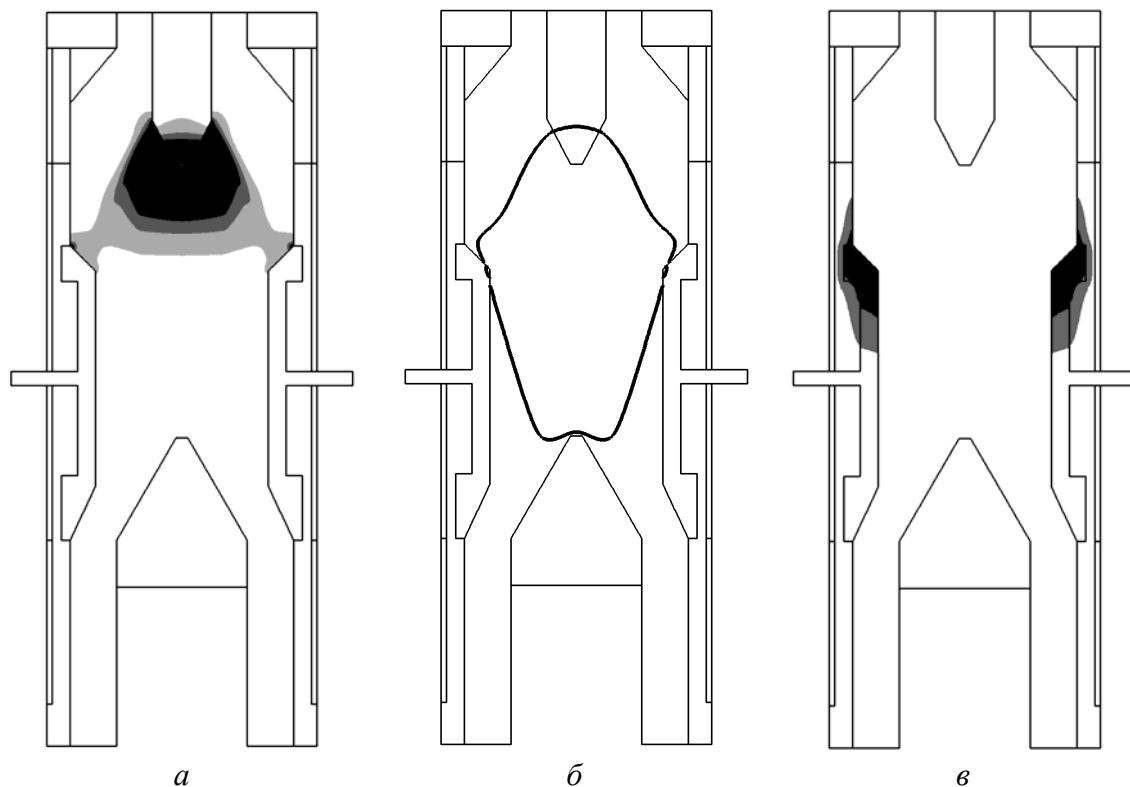


Рис. 5.11. Результати моделювання теплоелектричного стану модернізованої конструкції електрокальцинатора для графітування нафтового коксу:
 а – безрозмірної густини джерела теплоти; б – зона прожарювання $T_{\text{пр}} = 2200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau_{\text{пр}} = 2\text{ год}$; в – термічне навантаження на футеровку електропечі: ізотерма $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ (сіра) та $1900\text{ }^{\circ}\text{C}$ (чорна)

Характеристики роботи та теплоелектричного стану модернізованого електрокальцинатора для графітування нафтового коксу наведені у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Характеристики роботи та теплоелектричного стану модернізованого електрокальцинатора для графітування нафтового коксу

Характеристика	P , кВт	G , кг/год	I , кА	$C_{\text{пр}}$	$C_{\text{вв}})^*$
Значення	680	370	19,5	0,93	0,026

Примітка:)* $C_{\text{вв}}$ – відносний об'єм футеровки печі з високотемпературного вогнетриву, що знаходиться у зоні температури вище за $1900\text{ }^{\circ}\text{C}$

Приведені результати показують можливість застосування запропонованої конструкції для безперервного графітування нафтового коксу в електрокальцинаторі.

ВИСНОВКИ

Монографія присвячена вирішенню важливої науково-технічної задачі створення наукових засад розробки та вдосконалення технологічних процесів та обладнання для високотемпературного оброблення сипучих вуглецевих матеріалів в електропечах, які забезпечують раціональні експлуатаційні параметри та підвищення якості готової продукції, що сприяє ресурсоенергозбереженню й зменшенню техногенного впливу на довкілля.

1. У результаті аналізу стану проблеми з математичного моделювання фізичних полів процесу високотемпературного оброблення рухомого шару сипучих матеріалів в електричних печах встановлено, що в наявних математичних моделях не враховуються такі важливі особливості процесу термооброблення як динаміка сипучого середовища та хімічна взаємодія при високій температурі, а їх застосування обмежено областю, у якій виконувалася оцінка їх адекватності.

2. Розроблено фізичну та математичну моделі процесу високотемпературного оброблення рухомого шару сипучого вуглецевого матеріалу в електропечі, що базується на поєднанні дискретного уявлення про статику і динаміку сипучих речовин та математичних формулювань механіки суцільного середовища і ґрунтується на системі рівнянь: квазістаціонарного нелінійного рівняння безвихрового поля електричного потенціалу та нестационарного нелінійного неоднорідного рівняння теплопровідності з урахуванням конвективного переносу теплоти щільним рухомих шаром сипучого матеріалу, внутрішнього джерела Джоулевої теплоти та джерела теплоти від хімічних реакцій. Отримано математичне формулювання для встановлення зв'язку між рухом окремих частинок сипучого середовища у дискретній постановці та нерозривним полем швидкості системи як суцільного середовища.

3. Розроблено методику числового розв'язання сформульованої задачі теплоелектричного стану електропечей на базі методів МДЕ, МСО та відповідне ПЗ. Розроблено алгоритм розв'язання нелінійних теплоелектричних задач з використанням електричної потужності як задавальної величини при моделюванні поля електричного потенціалу.

4. Розроблено методику експериментального визначення КПУ для сипучих матеріалів, що дає можливість враховувати складність та несиметричність форми гірки матеріалу.

5. Проведено верифікацію та налаштування дискретної моделі статики та динаміки сипучого матеріалу на прикладі формування КПУ. Похибка розрахованого за допомогою числової моделі КПУ не перевищує 3 %. З використанням числової моделі, що реалізує МДЕ, досліджено вплив ефективних коефіцієнтів тертя ковзання і кочення на формування КПУ.

Проведено серію числових експериментів динаміки рухомого шару сипучого матеріалу з використанням спрощеної моделі електрокальцинатора. Одержано рівняння, що описують результуючий профіль безрозмірної швидкості щільного рухомого шару сипучого матеріалу, який повільно рухається у каналах круглого та кільцевого перерізу. Коефіцієнт детермінації отриманих залежностей становить: для круглого перерізу – 0,984, а для кільцевого – 0,926.

6. Узагальнено дані з показників якості кінцевого продукту, що оброблюється в електрокальцинаторі. Визначено, що при високотемпературному обробленні вуглецевих матеріалів регламентуються гранично допустимі значення ПЕО_n та $\rho_{\text{іст}}$: для антрациту – $\text{ПЕО}_n < 1000 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$; нафтового коксу – $\text{ПЕО}_n < 150 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$ та $\rho_{\text{іст}} > 2200 \text{ кг/м}^3$. Для одержання заданих параметрів якості кінцевого продукту в електрокальцинаторі потрібно створити зону прожарювання, яка забезпечить для антрациту $T_{\text{пр}} \geq 1300 \text{ }^\circ\text{C}$ при витримці за цієї температури $\tau_{\text{пр}} = 2 \text{ год}$ і для нафтового коксу $T_{\text{пр}} \geq 2200 \text{ }^\circ\text{C}$ при $\tau_{\text{пр}} = 2 \text{ год}$. Проведено експериментальні дослідження температурної залежності ПЕО і теплопровідності антрациту та нафтового коксу, що оброблюються в електрокальцинаторі.

7. Отримано експериментальні дані з теплоелектричного стану електрокальцинаторів різних конструкцій при термообробці антрациту і нафтового коксу та виконано їх аналіз.

8. Розроблено числові моделі високотемпературного оброблення сипучих електропровідних матеріалів в електрокальцинаторах з урахуванням руху середовища та хімічної взаємодії, які дають змогу отримувати числові результати з фізичних полів та технологічних показників роботи агрегатів при різних регламентах та конструктивних параметрах, що є необхідним при вдосконаленні діючих і створенні нових (або модернізованих) процесів та обладнання хімічної технології.

9. Проведено оцінку достовірності запропонованих числових методик і отриманих результатів теоретичних досліджень за допомогою тестування розробленого ПЗ на відомих аналітичних і числових розв'язках. Результати верифікації розроблених числових моделей високотемпературного оброблення рухомого шару сипучих вуглецевих матеріалів на даних натурних експериментів показали, що похибка числових розв'язків не перевищує 14 % для значень повного електричного опору та 17 % для значень температури за відсутності локальних перегрівів.

10. Розроблено систему визначальних технологічних показників роботи електрокальцинатора, яка є необхідною при проектуванні електрокальцинаторів різного призначення та потужності. Проаналізовано вплив на теплоелектричний стан електричної печі різного дизайну дроселювального пристрою – дросель-

шайби. Теоретично досліджено та визначено раціональні значення, геометричних параметрів дросель-шайби, активної електричної потужності та продуктивності на визначальні технологічні показники експлуатації обладнання.

11. Розроблено науково-обґрунтований ресурсо- та енергозберігаючий регламент пуску та експлуатації електрокальцинатора для термічної обробки антрациту, що забезпечує необхідну якість кінцевого продукту та довготривалу експлуатацію обладнання.

12. Запропоновано конструкцію електрокальцинатора, що дає можливість проводити неперервний процес графітування нафтового коксу при забезпеченні заданої якості кінцевого продукту, довготривалої експлуатації обладнання та ресурсоенергозбереження.

ДОДАТОК А

Результати розрахунків динаміки сипучого матеріалу за спрощеною моделлю електрокальцинатора

На рис. А.1 наведено результати числового моделювання методом МДЕ руху матеріалу у спрощеному електрокальцинаторі.

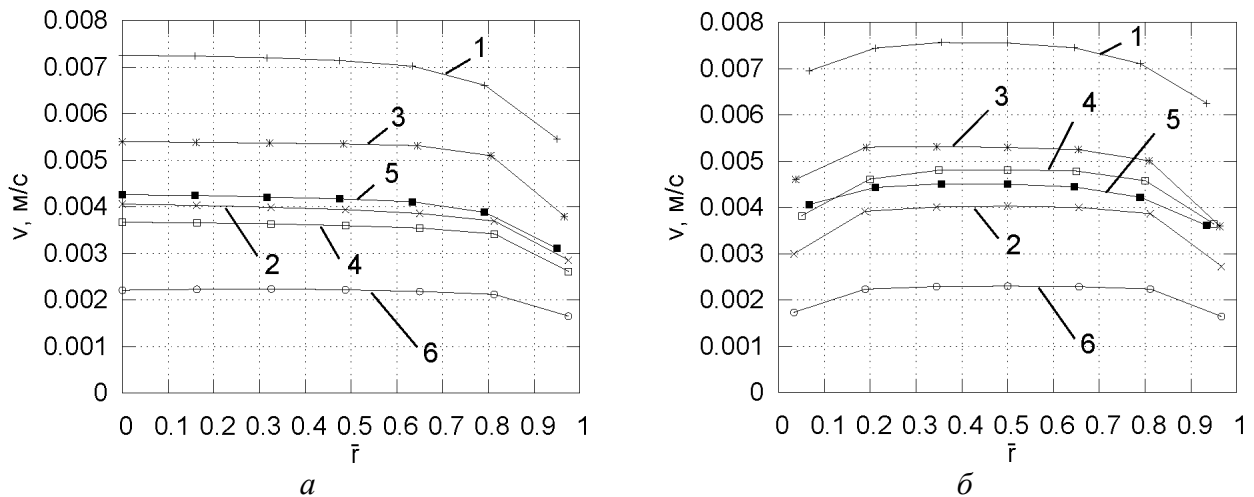


Рис. А.1. Результати моделювання руху матеріалу у спрощеному електрокальцинаторі:

1 – варіант № 1; 2 – варіант № 2; 3 – варіант № 3; 4 – варіант № 4;

5 – варіант № 5; 6 – варіант № 6:

a – результуюча розмірна швидкість в круглому каналі; b – результуюча розмірна швидкість в кільцевому каналі; значення швидкості приведені до безрозмірної радіальної координати

ДОДАТОК Б

Результати апробації OpenFOAM для задач теплового та теплоелектричного стану твердих тіл

Для апробації програмного коду OpenFOAM проведена серія тестових розрахунків і їх порівняння з відповідними аналітичними розв'язками, а також розв'язками, отриманими за допомогою КПЗ.

Задача 1. Стаціонарна нелінійна теплопровідність тришарової стінки. Геометрична область складається з трьох стінок, що мають відповідну товщину 0,4 м, 0,2 м, 0,4 м. Матеріали стінок – тестові матеріали 1, 2, 3 – відповідно (табл. Б.6). Граничні умови: Неймана – задана щільність теплового потоку на поверхні стінки $q=1000$ Вт/м²; Робена – задані коефіцієнт тепловіддачі $\alpha = 7$ Вт/(м²·К) і температура навколишнього середовища $T_{\infty} = 300$ К. Дискретизація моделі являє собою структуровану сітку з 10000 шестигранних елементів еквівалентного розміру.

Таблиця Б.1 – Зіставлення результатів розв'язання задачі 1, отриманих різними методами

Розрахункова величина	Точний розв'язок [121,122]	КПЗ	OpenFOAM
Температура на гарячій стінці, К	1598,93	1598,82	1598,96
Температура між 1 і 2 стінкою, К	1563,71	1565,58	1565,72
Температура між 2 і 3 стінкою, К	853,07	853,07	853,08
Температура на холодній стінці, К	442,82	442,82	442,82

Задача 2. Стаціонарна задача нагріву внутрішнім джерелом теплоти двох однакових циліндрів. Діаметр і довжина кожного складають 0,2 і 0,2 м, відповідно. Циліндри знаходяться в ідеальному контакті торцевими поверхнями. Дискретний аналог геометричної моделі – сітка з 28854 шестигранних елементів. Фізичні властивості циліндрів – ідентичні (тестовий матеріал 4 (табл. Б.7)) та однакове внутрішнє джерело теплоти $S_1 = S_2 = 40000$ Вт/м³. На бічній поверхні циліндрів задані граничні умови Робена: коефіцієнт тепловіддачі $\alpha = 7$ Вт/(м²·К) і температура навколишнього середовища $T_{\infty} = 300$ К. На зовнішніх торцевих поверхнях задані адіабатні граничні умови.

Таблиця Б.2 – Зіставлення результатів розв’язання задачі 2, отриманих різними методами

Розрахункова величина	Точний розв’язок [121,122]	КПЗ	OpenFOAM
Середня об’ємна температура, К	592,04	591,7	591,65
Максимальна температура, К	598,37	598	597,89
Мінімальна температура, К	585,71	586,15	585,01

Задача 3. Аналогічна задачі 2 по геометричних умовах, але для елементів використовуються різні нелінійні фізичні властивості: перший циліндр – тестовий матеріал 5, другий циліндр – тестовий матеріал 6 (табл. Б.8), а також задані різні джерела теплоти: $S_1 = 80000 \text{ Вт/м}^3$, $S_2 = 40000 \text{ Вт/м}^3$.

Таблиця Б.3 – Зіставлення результатів розв’язання задачі 3, отриманих різними методами

Розрахункова величина	КПЗ	OpenFOAM
Середня об’ємна температура елемента 1, К	791,26	791,14
Середня об’ємна температура елемента 2, К	700,54	700,46
Максимальна температура елемента 1, К	854,32	853,92
Максимальна температура елемента 2, К	725,27	726,89
Мінімальна температура елемента 1, К	709,32	704,58
Мінімальна температура елемента 2, К	687,54	686,48
Середня температура на поверхні контакту, К	718,36	716,95

Задача 4. Зв’язана електротермічна задача стаціонарного електричного нагріву трьох зразків квадратного перерізу (з габаритними розмірами 1,3 – $0,3 \times 0,2 \times 0,2 \text{ м}$, 2 – $0,4 \times 0,2 \times 0,2 \text{ м}$), що з’єднані послідовно, знаходяться в ідеальному контакті торцевими поверхнями. Теплофізичні властивості зразків приймалися однаковими, а електропровідність центрального – у 4 рази менше, ніж бічних (тестовий матеріал 7 та 8, для бічних і центрального зразків, відповідно (табл. Б. 9)). На зовнішній поверхні зразків задані граничні умови Робена: коефіцієнт тепловіддачі $\alpha = 7 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ і температура навколишнього середовища $T_\infty = 300 \text{ К}$. По торцевих поверхнях – адіабатні умови. Перепад напруги по довжині системи зразків 5 В. Геометрична модель дискретизована структурованої сіткою з 40000 шестигранних елементів еквівалентного розміру.

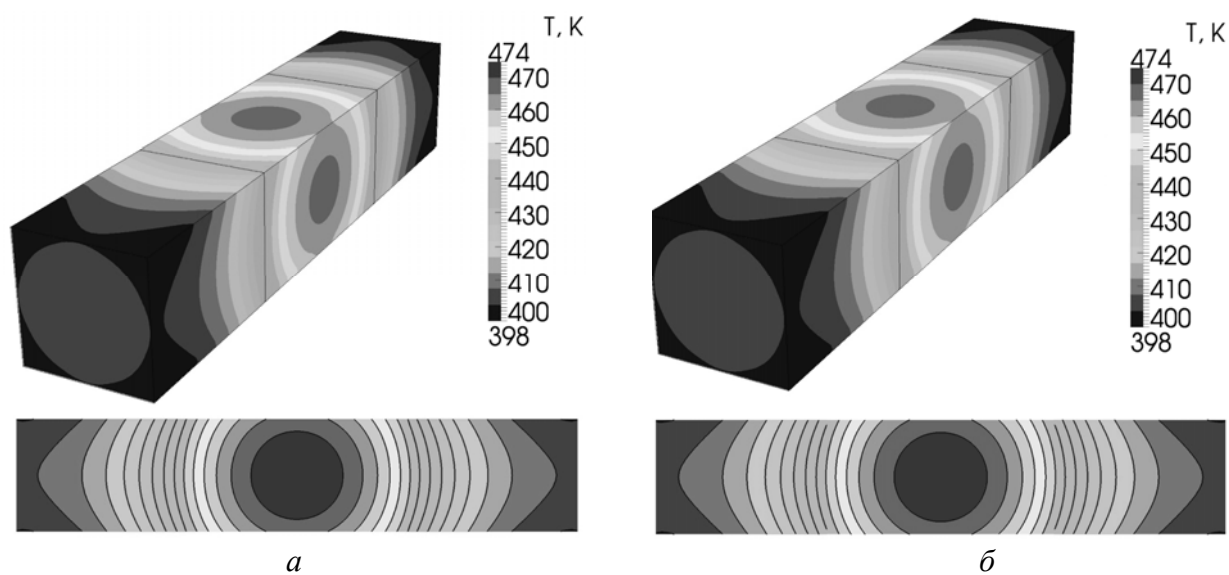


Рис. Б.1. Стаціонарне поле температур, задача 4:
а – КПЗ; б – OpenFOAM

Таблиця Б.4 – Зіставлення результатів розв’язання задачі 4, отриманих різними методами

Розрахункова величина	КПЗ	OpenFOAM	Точний розв’язок
Середня об’ємна температура елемента 1, К	416,02	415,96	-
Максимальна температура елемента 1, К	444,55	445,95	-
Мінімальна температура елемента 1, К	398,96	398,46	-
Середня об’ємна температура елемента 2, К	460,22	460,16	-
Максимальна температура елемента 2, К	473,74	473,68	-
Мінімальна температура елемента 2, К	436,53	435,11	-
Середня об’ємна температура елемента 3, К	416,03	415,96	-
Максимальна температура елемента 3, К	444,56	445,95	-
Мінімальна температура елемента 3, К	398,96	398,46	-
Потужність джерела теплоти в 1 і 3 елементах, Вт/м ³	8264,32	8264,46	8264,46
Потужність джерела теплоти у елементі 2, Вт/м ³	33057,76	33057,85	33057,85
Сила струму, А	145,45	145,45	145,46
Сумарна електрична потужність, Вт	727,27	727,27	727,27

Задача 5. Зв’язана електротермічна задача нестационарного електричного нагріву прямокутного бруса (габаритні розміри $1 \times 0,4 \times 0,4$ м) з тестового матеріалу 9 (табл. Б.10), з розташованим всередині нього кубом (габаритні розміри $0,2 \times 0,2 \times 0,2$ м) з тестового матеріалу 10 (рис. Б.2). На зовнішній поверхні зразків задані граничні умови Робена: коефіцієнт тепловіддачі $\alpha = 7$ Вт/(м²·К) і температура навколишнього середовища $T_{\infty} = 300$ К. По торцевих поверхнях – адіабатні умови. Перепад напруги по довжині системи зразків 5 В. Дискретизована геометрична модель являє собою сітку з 20000 шестигранних елементів еквівалентного розміру.

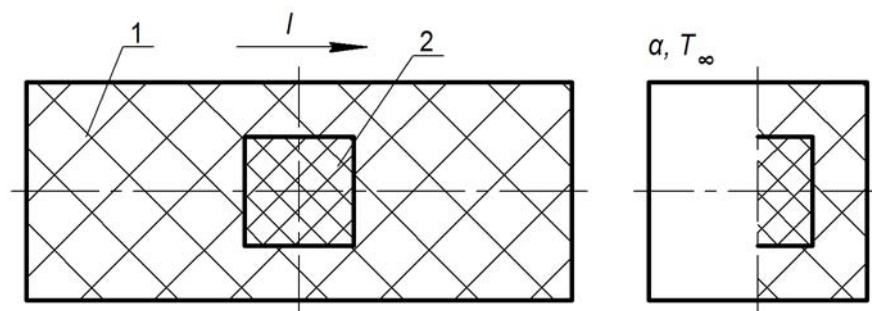


Рис. Б.2. Геометричні умови задачі 5

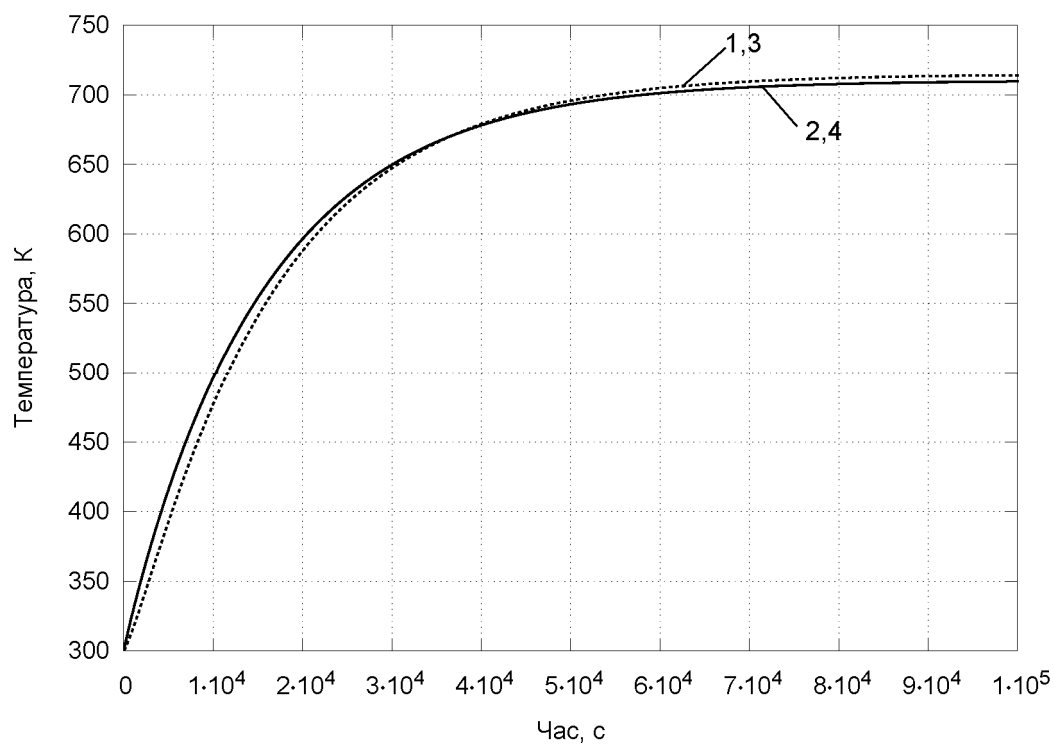


Рис. Б.3. Зміна середньої об'ємної температури з часом для задачі 5:

1 – середня об'ємна температура елемента 1 (КПЗ); 2 – середня об'ємна температура елемента 2 (КПЗ); 3 – середня об'ємна температура елемента 1 (OpenFOAM); 4 – середня об'ємна температура елемента 2 (OpenFOAM)

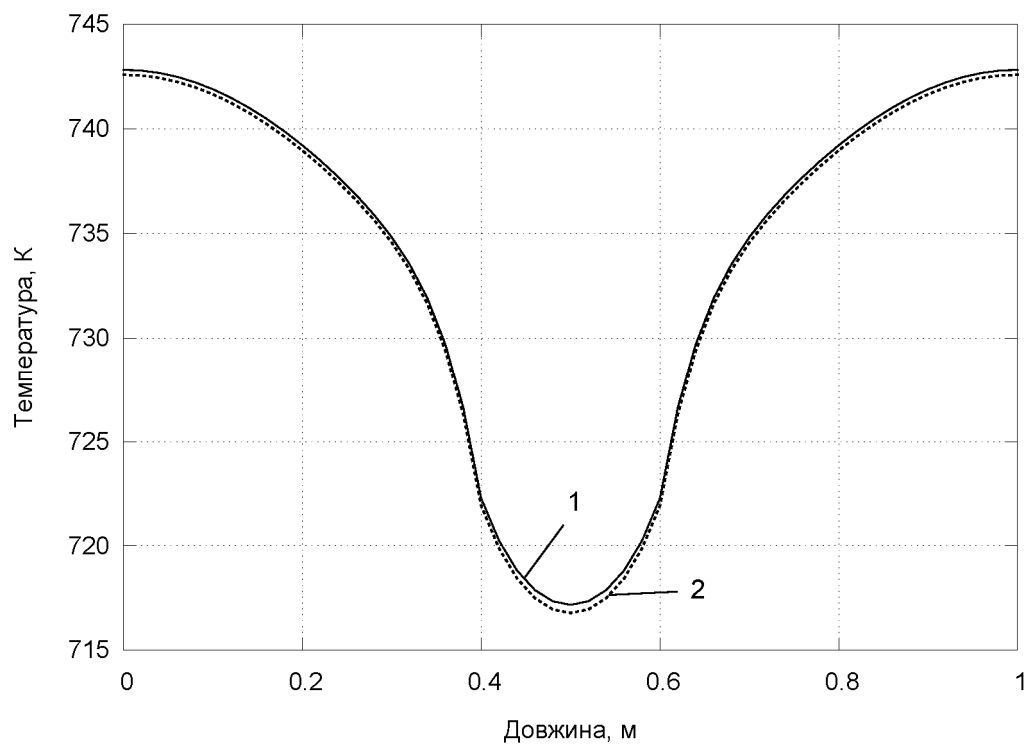


Рис. Б.4. Профіль температури вздовж центральної вісі брусів при усталеному стаціонарному режимі задачі 5:
1 – КПЗ; 2 – OpenFOAM

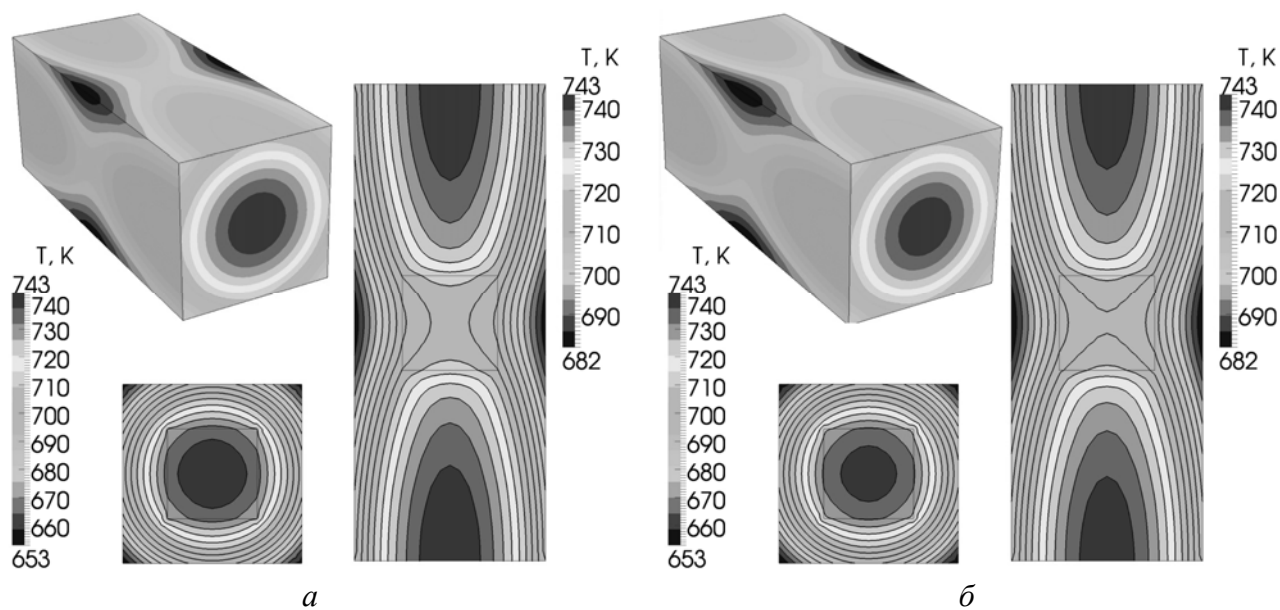


Рис. Б.5. Поле температур при усталеному стаціонарному режимі, задачі 5:
а – КПЗ; б – OpenFOAM

Таблиця Б.5 – Зіставлення результатів розв’язання задачі 5, отриманих різними методами

Розрахункова величина	КІЗ	OpenFOAM
Середня об'ємна температура елемента 1, К	709,94	709,57
Максимальна температура елемента 1, К	742,37	742,12
Мінімальна температура елемента 1, К	657,49	653,96
Середня об'ємна температура елемента 2, К	714,17	713,93
Максимальна температура елемента 2, К	720,60	721,20
Мінімальна температура елемента 2, К	706,89	704,94
Потужність джерела теплоти у 1 елементі, Вт/м ³	4148,10	4153,90
Потужність джерела теплоти у 2 елементі, Вт/м ³	181,91	181,91
Сила струму, А	867,16	866,75
Сумарна електрична потужність, Вт	4335,82	4329,27

Таблиця Б.6 – Фізичні властивості матеріалів для задачі 1

Т, К	Тестовий матеріал 1			Тестовий матеріал 2			Тестовий матеріал 3		
	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	c_p , Дж/(кг·К)	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	c_p , Дж/(кг·К)	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	c_p , Дж/(кг·К)
300	1550	8,6	1301	1900	0,81	1029	330	0,22	1246
600	1550	9,4	1567	1900	0,96	1137	330	0,24	1530
900	1550	10,2	1717	1900	1,08	1208	330	0,26	1682
1200	1550	11,0	1844	1900	1,11	1269	330	0,28	1799
1500	1550	11,8	1930	1900	1,11	1279	330	0,3	1897
1800	1550	12,7	2002	1900	1,11	1279	330	0,32	1995
2100	1550	13,5	2137	1900	1,11	1279	330	0,34	2085
2400	1550	14,4	2175	1900	1,11	1279	330	0,36	2175
2700	1550	15,3	2267	1900	1,11	1279	330	0,38	2267
3000	1550	16,2	2357	1900	1,11	1279	330	0,4	2357

Таблиця Б.7 – Фізичні властивості матеріалів для задачі 2

	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	c_p , Дж/(кг·К)
Тестовий матеріал 4	500	7,9	1841

Таблиця Б.8 – Фізичні властивості матеріалів для задачі 3

Т, К	Тестовий матеріал 5			Тестовий матеріал 6		
	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	c_p , Дж/(кг·К)	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	c_p , Дж/(кг·К)
250	500	1,2	1166	1640	11,3	1226
500	500	1,6	1461	1640	11,8	1499
750	500	2,4	1613	1640	12,1	1648
1000	500	3,4	1721	1640	12,2	1759
1250	500	4,5	1816	1640	12,5	1866
1500	500	6	1897	1640	13,1	1930
1750	500	7,2	1979	1640	14,5	1986
2000	500	10	2054	1640	16,8	2101
2250	500	11,5	2131	1640	20	2157
2500	500	13	2206	1640	23,5	2206
2750	500	14,8	2282	1640	26,1	2282
3000	500	16,7	2357	1640	26,8	2357
3250	500	17	2433	1640	26,9	2433

Таблиця Б.9 – Фізичні властивості матеріалів для задачі 4

	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	c_p , Дж/(кг·К)	σ , 1/(Ом·м)
Тестовий матеріал 7	500	7,9	1841	1600
Тестовий матеріал 8	500	7,9	1841	400

Таблиця Б.10 – Фізичні властивості матеріалів для задачі 5

	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	c_p , Дж/(кг·К)	σ , 1/(Ом·м)
Тестовий матеріал 9	500	7,9	1841	5000
Тестовий матеріал 10	1640	17	1869.3	1000

ДОДАТОК В

Результати експериментальних досліджень на промисловому обладнанні

Результати натурних вимірювань на експериментальній кампанії прожарювання антрациту в електрокальцинаторі № 1 представлено на рис. В.1 – В.2

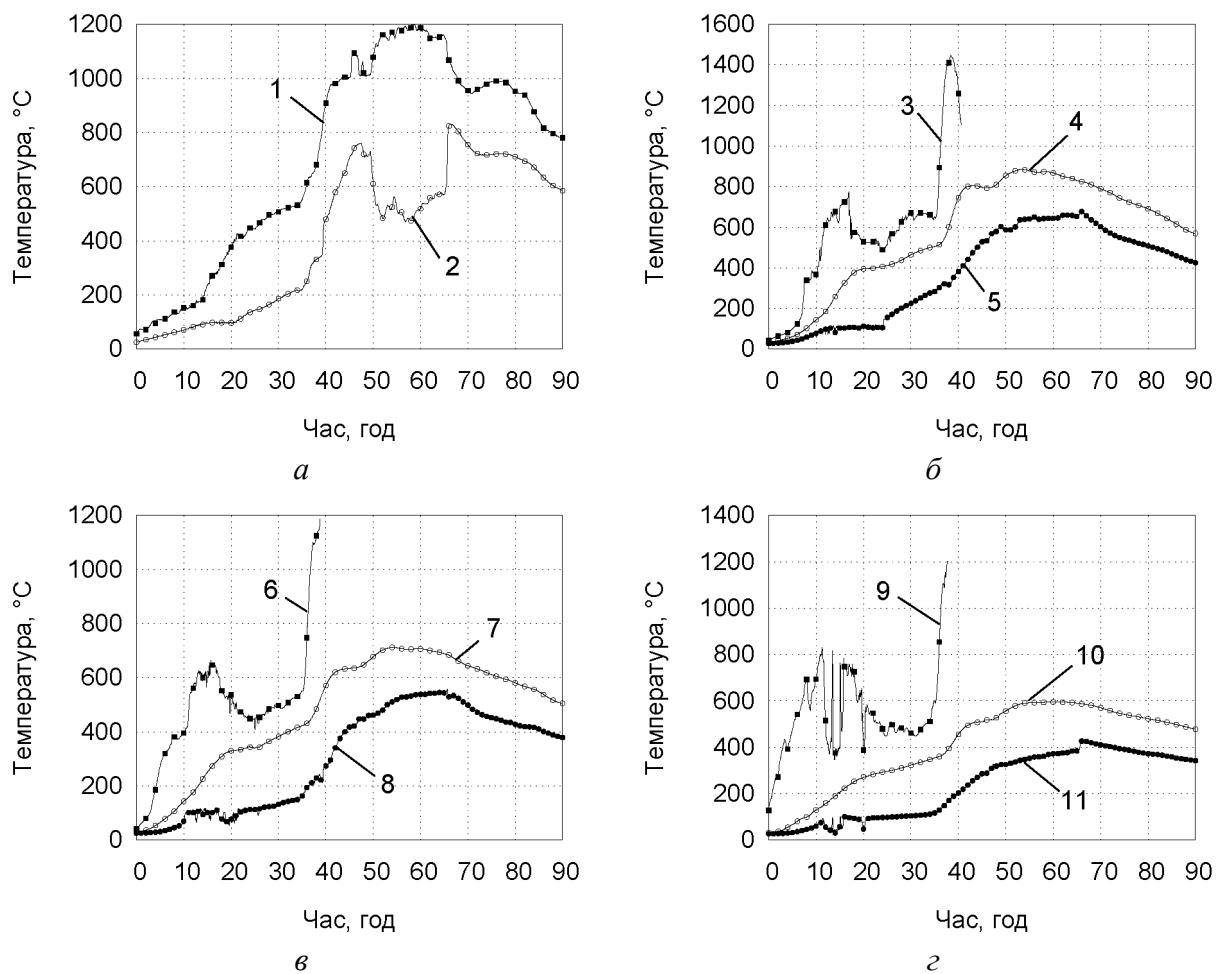
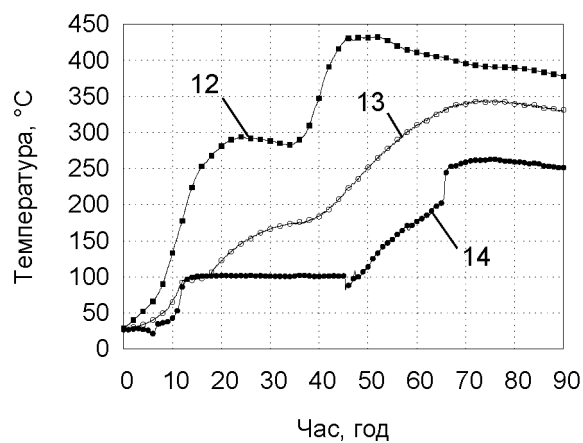
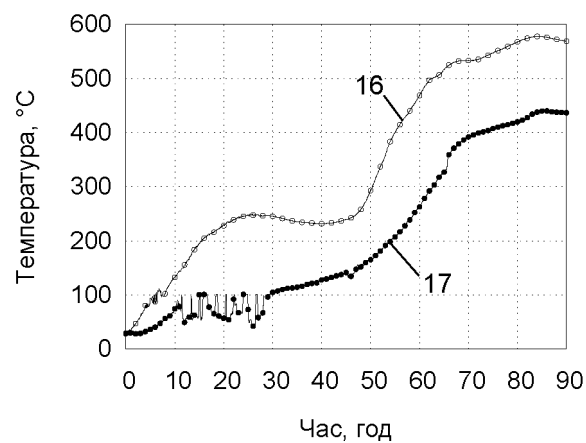


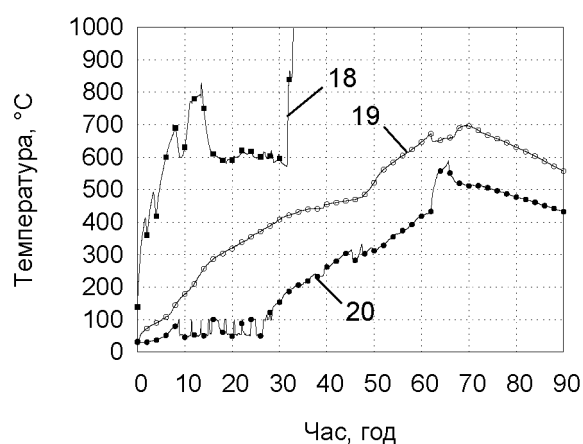
Рис. В.1. Температура в точках, що виміряна на експериментальній кампанії № 1:
а – під дросель-шайбою: т. 1, 2; б, в – у електропровідній частині дросель-шайби:
т. 3–8; г – відповідно; в, г – на контакті між неелектропровідною та електропровідною
частинами дросель-шайби : т. 9, 10, 11



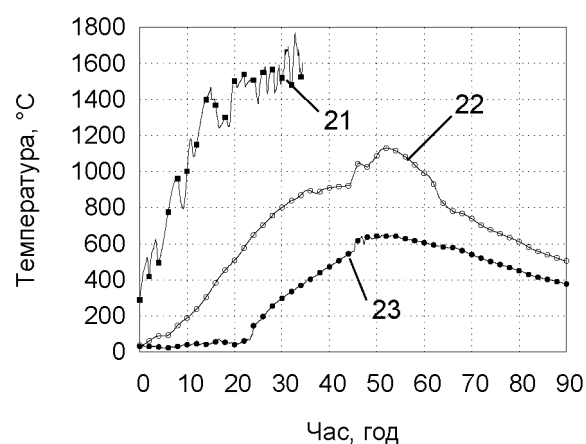
a



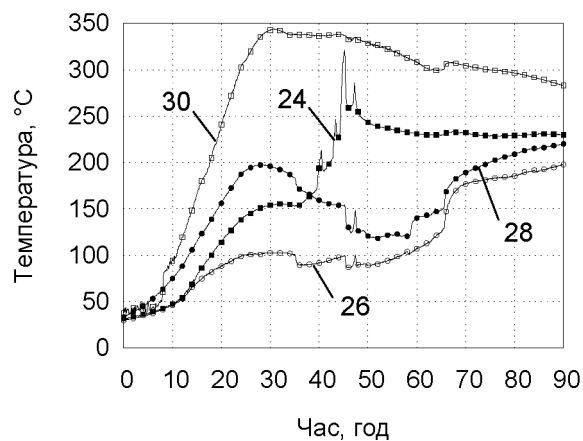
б



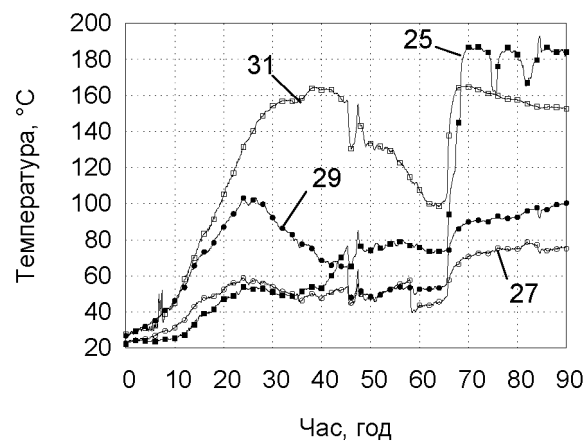
в



г



д



е

Рис. В.2. Температура в точках, що виміряна на експериментальній кампанії № 1:
a – у неелектропровідній частині дросель-шайби: т. 12, 13, 14; *б, в, г* – на контакті між неелектропровідною та електропровідною частинами дросель-шайби: т. 15–23;
г, е – над дросель-шайбою: т. 24–31

Результати натурних вимірювань на експериментальній кампанії прожарювання антрациту в електрокальцинаторі № 2 представлено на рис. В.2 – В.4

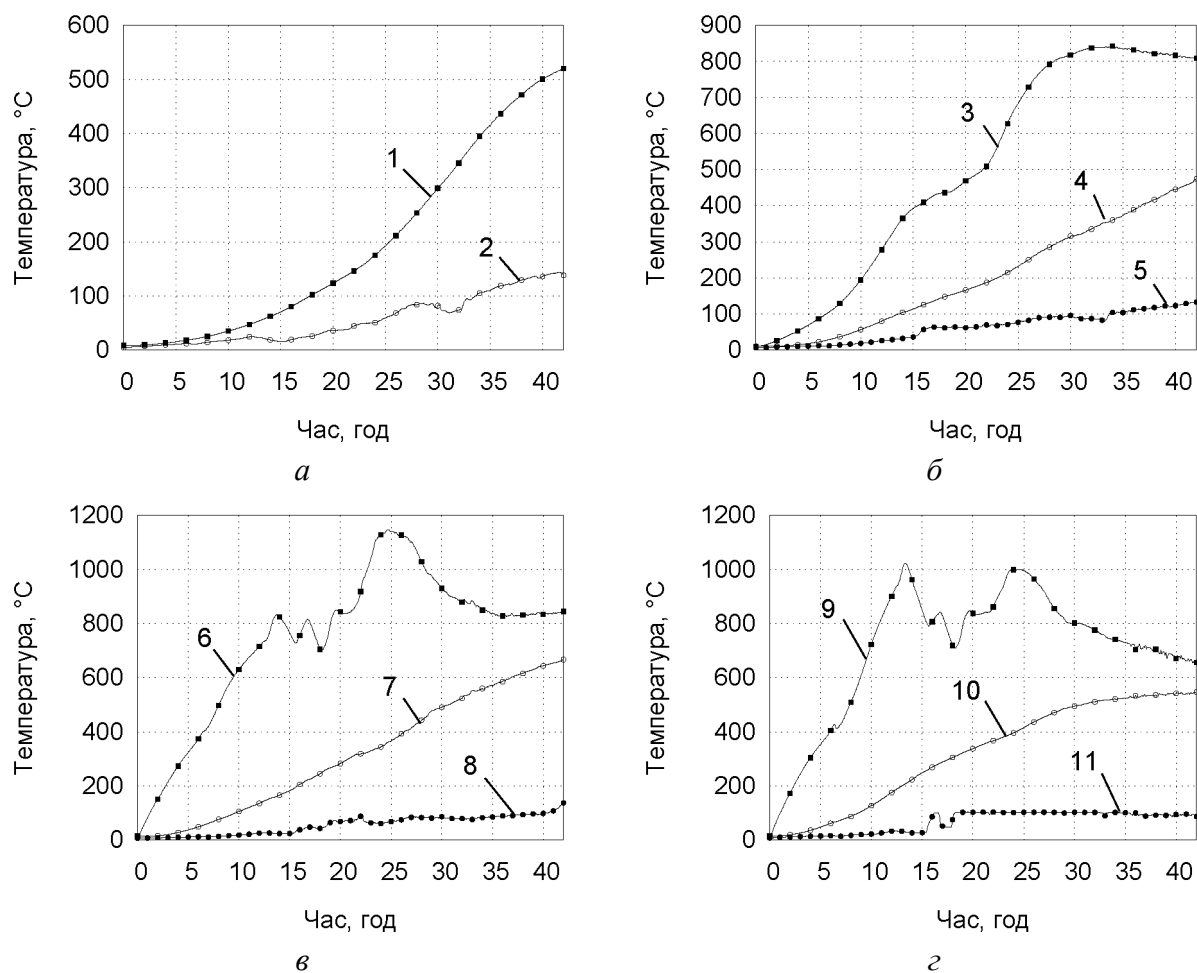
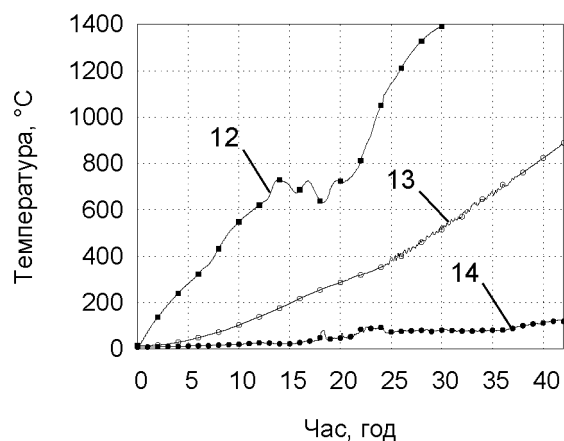
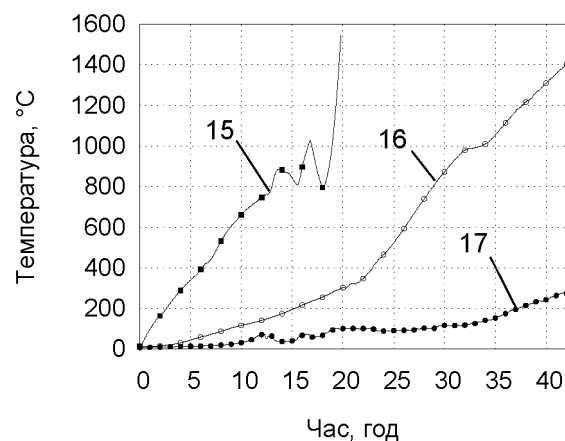


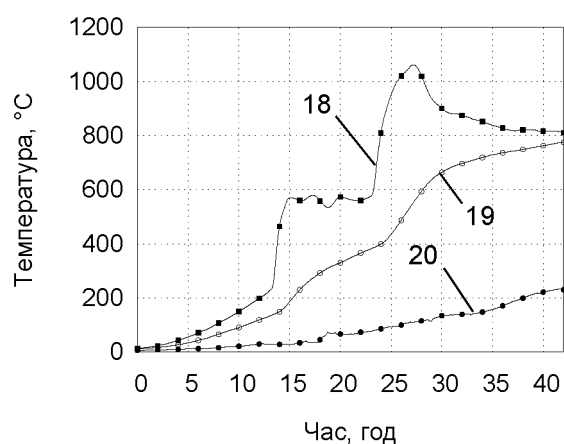
Рис. В.3. Температура в точках, що виміряна на експериментальній кампанії № 2: а – над дросель-шайбою: т. 1, 2; б – у неелектропровідній частині дросель-шайби: т. 3, 4, 5; в, г – на контакті між неелектропровідною та електропровідною частинами дросель-шайби: т. 6–11



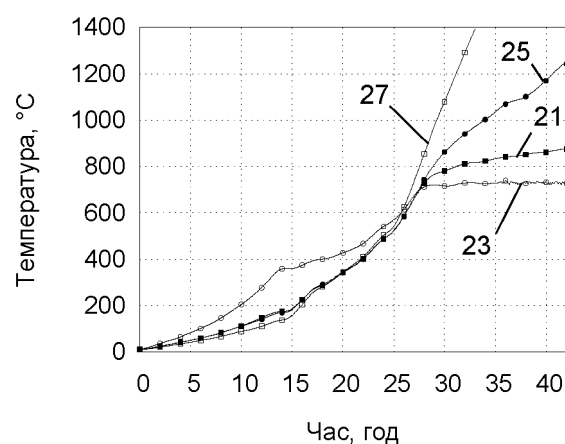
a



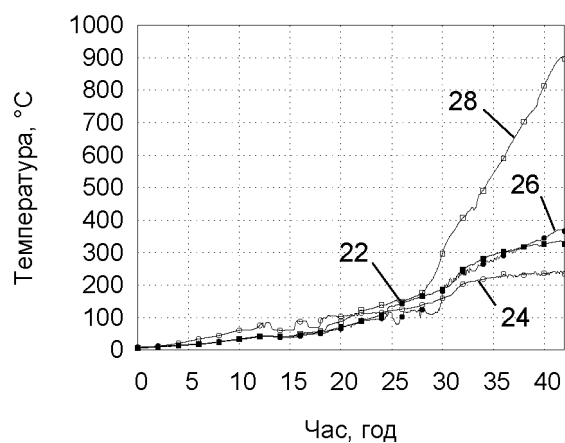
б



в



г



д

Рис. В.4. Температури в точках, що виміряні на експериментальній кампанії № 2:
a, б – на контакті між неелектропровідною та електропровідною частинами дросель-
 шайби: т. 12–17; *в* – у електропровідній частині дросель-шайби: т. 18, 19, 20;
г, д – під дросель-шайбою: т. 21–28

Оцінка похибки експериментальних досліджень

Г.1. Теоретичні основи оцінки похибки експериментальних вимірювань

Оцінка достовірності експериментальних даних проводиться за величиною помилки їх отримання і довірчій ймовірності, що відповідає цій похибці [124–129]. Під похибкою вимірювання фізичної величини розуміють відхилення результатів вимірювань від її істинного значення. В експериментальній практиці розрізняють абсолютні і відносні похибки вимірювань. Похибки вимірювань також підрозділяються за причинами їх виникнення на: методичні, систематичні, випадкові й невизначені.

Методична похибка викликана наближеним характером функціональної залежності, що використовується в експерименті та іншими чинниками. Систематична похибка обумовлена впливом відомих і контрольованих факторів і виявляється багатократними вимірами. Зазвичай методичну і систематичну похибки об'єднують в одну і називають її систематичною помилкою. Випадкова похибка пов'язана з впливом невідомих і неконтрольованих параметрів в експерименті. Числовою мірою випадкової похибки є дисперсія S

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2, \quad (\text{Г.1.1})$$

де n – кількість вимірів; $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ – найбільш ймовірне значення вимірюваної величини або середнє арифметичне її значення; x_i – окреме значення вимірюваної величини.

При виконанні експериментальних досліджень кількість вимірювань n є обмеженою, тому для випадкової похибки окремого виміру $\theta(x_i)$ застосовується вибіркова дисперсія

$$\theta(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}. \quad (\text{Г.1.2})$$

При малій кількості вимірювань також використовуються поправкові коефіцієнти, які отримані на основі розподілу ймовірності Ст'юдента [125, 126, 129]

$$\theta(x_i) = \xi \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}, \quad (\text{Г.1.3})$$

де ξ – коефіцієнт Ст'юдента.

Значення $\xi = f(n, P)$ визначаються з таблиць залежно від кількості вимірювань і довірчої ймовірності P . Зазвичай використовуються такі значення довірчої ймовірності: $P = 0,68; 0,95; 0,997$.

З математичної статистики відомо, що \bar{x} і $S(\bar{x})$ є також випадковими величинами. При цьому похибка середнього значення величини \bar{x} обернено пропорційна кореню квадратному з числа відліку, за яким одержано значення величини \bar{x} . З врахуванням цього похибка середнього результату прямих вимірювань знаходиться за формулою

$$\theta(\bar{x}) = \xi \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}. \quad (\text{Г.1.4})$$

Невизначена похибка включає невраховані залишки систематичних похибок, а також систематичних і випадкових похибок інструментального характеру. Вони виникають внаслідок похибок вимірювальних приладів, інструментів і датчиків. Цей клас похибок також включає похибка зчитування результатів зі шкали приладу, округлювання значень величин, табличних даних та ін.

В загальному невизначена дослідно-експериментальна похибка середнього виміру величини x визначається за формулою

$$\delta(\bar{x}) = \sqrt{\delta_{\text{дат}}^2 + \delta_{\text{пр}}^2 + \delta_{\text{окр}}^2}, \quad (\text{Г.1.5})$$

де $\delta_{\text{дат}}, \delta_{\text{пр}}, \delta_{\text{окр}}$ – похибки вимірювального датчика, приладу і округлення, відповідно.

Повна похибка прямого виміру величини x визначається за формулою

$$\sigma(\bar{x}) = \sqrt{\theta^2(\bar{x}) + \delta^2(\bar{x}) + \delta^2(\psi_k)}, \quad (\text{Г.1.6})$$

де $\delta^2(\psi_k)$ – систематична і методична похибки.

Остаточне істинне значення вимірюваної величини x можна представити у такому виді

$$\begin{cases} x = \bar{x}(1 + \sum \psi_k) \pm \sigma(\bar{x}) \text{ при } P = 0,68; \\ x = \bar{x}(1 + \sum \psi_k) \pm 2\sigma(\bar{x}) \text{ при } P = 0,95; \\ x = \bar{x}(1 + \sum \psi_k) \pm 3\sigma(\bar{x}) \text{ при } P = 0,997, \end{cases} \quad (\text{Г.1.7})$$

де $\pm \sigma(\bar{x})$, $\pm 2\sigma(\bar{x})$, $\pm 3\sigma(\bar{x})$ – границі довірчих інтервалів; $\psi_k = \frac{\Delta x_k}{\bar{x}}$ – поправка на вплив систематичної похибки k -го фактору; Δx_k – абсолютна систематична похибка k -го фактору.

Г.2. Оцінка похибки дослідження температур за допомогою термопар

Гранично допустима основна (інструментальна або датчика) похибка при використанні хромель-алюмелевих термопар (ТХА) по ГОСТ 3044–74 при довірчій ймовірності $P = 0,997$ складає [124]

$$3\delta_{\text{Е.Р.С.}} = 0,16 + 2 \cdot 10^{-4}(t - 300), \text{ мВ},$$

що відповідає похибці визначення температури:

$$3\delta(t) = 4,0 + 5 \cdot 10^{-3}(t - 300), \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Максимальні значення похибки припадають на верхній температурний діапазон вимірювань. При температурі $t = 1100^{\circ}\text{C}$ маємо $3\delta_{\text{ТХА}}(t) = 7,5^{\circ}\text{C}$ при $P = 0,997$ і $\delta_{\text{ТХА}}(t) = 2,5^{\circ}\text{C}$ при $P = 0,68$.

При використанні вольфрам-ренієвих термопар (ТВР 5/20) по ГОСТ 3044–74 гранично допустима похибка датчика при довірчій ймовірності $P = 0,997$ складає [124]

$$3\delta_{\text{Е.Р.С.}} = 0,08 + 4 \cdot 10^{-5}(t - 1000), \text{ мВ},$$

що відповідає похибці вимірювання температури $t = 1500^{\circ}\text{C}$

$$3\delta_{\text{ТВР}}(t) = 7,4^{\circ}\text{C} \text{ при } P = 0,997 \text{ та } \delta_{\text{ТВР}}(t) = 2,5^{\circ}\text{C} \text{ при } P = 0,68.$$

Клас точності автоматизованого вимірювального комплексу [110], що застосовується при експериментальних дослідженнях, становить $\delta_{\text{пр}} = 0,1\%$, а $\delta_{\text{окр}} = 0$ завдяки використанню ВК. Крім того до дослідно-експериментальної

похибки вимірювання температури слід віднести похибку, яка пов'язана з вимірюванням температури холодних спаїв (за даними експерименту для різних термопар ця похибка вимірювального модуля I-7018 не перевищує 2 °С) і похибку, пов'язану з неточністю встановлення гарячих спаїв у термопарному чохлі (за експериментальними даними – не перевищує 5 °С для ТХА та 10 °С для ТВР).

Тоді дослідно-експериментальна погрішність вимірювання температури (Г.1.5) буде становити при $P = 0,68$:

$$\text{для ТХА} - \delta_{\text{ТХА}}(t) = \sqrt{2,5^2 + 1^2 + 2^2 + 5^2} = 6,0 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\text{для ТВР} - \delta_{\text{ТВР}}(t) = 10,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

При використанні автоматизованого ВК [110] відбувається безперервне вимірювання температур і, відповідно, їх запис у часі, тому кожному моменту часу відповідає одиничний вимір температури однією термопарою. Тому випадкова похибка, що пов'язана з кількістю вимірювань однією і тією ж самою величиною буде рівнятися нулю у формулі (Г.1.5).

Тоді повна абсолютна і відносна похибка вимірювань температур буде становити:

$$\text{ТХА} - \sigma_{\text{ТХА}}(t) = \delta_{\text{ТХА}}(t) = 6,0 \text{ } ^\circ\text{C}, \sigma_{\text{відн ТХА}}(t) = \frac{\sigma_{\text{відн}}(t)}{\bar{t}} 100 = 0,55 \text{ } \%;$$

$$\text{для ТВР} - \sigma_{\text{ТВР}}(t) = \delta_{\text{ТВР}}(t) = 10,5 \text{ } ^\circ\text{C}, \sigma_{\text{відн ТВР}}(t) = 0,7 \text{ } \%.$$

Систематична похибка, яка пов'язана з нестационарністю процесу ψ_τ , визначається співвідношенням:

$$\psi_\tau = \frac{\frac{\partial t}{\partial \tau} \Delta \tau}{t}, \quad (\text{Г.2.1})$$

де $\frac{\partial t}{\partial \tau}$ – темп зміни вимірюваної температури, К/с; $\Delta \tau$ – тривалість проведення одного циклу вимірювань, с.

З оцінки впливу ψ_τ на похибку вимірювання температури витікає. Прийемо величину темпу нагріву 30 К/ч (який має місце при високотемпературному обробленні сипучих вуглецевих матеріалів в

електрокальцинаторі), $\Delta\tau = 60$ с, рівень вимірюваних температур 1100°C .
Тоді отримуємо

$$\psi_\tau = \frac{30 \cdot 60}{3600 \cdot 1100} = 4,5 \times 10^{-4}.$$

Після підстановки отриманих поправки і похибки у формулу (Г.1.7),
отримуємо для ТХА

$$\begin{cases} t = 1100(1 + 4,5 \times 10^{-4}) \pm 6,0^\circ\text{C} \text{ при } P = 0,68; \\ t = 1100(1 + 4,5 \times 10^{-4}) \pm 18,0^\circ\text{C} \text{ при } P = 0,997. \end{cases}$$

а для ТВР при $\psi_\tau = 0,0003$

$$\begin{cases} t = 1500(1 + 0,0003) \pm 10,5^\circ\text{C} \text{ при } P = 0,68; \\ t = 1500(1 + 0,0003) \pm 31,5^\circ\text{C} \text{ при } P = 0,997. \end{cases}$$

Верифікація числових моделей

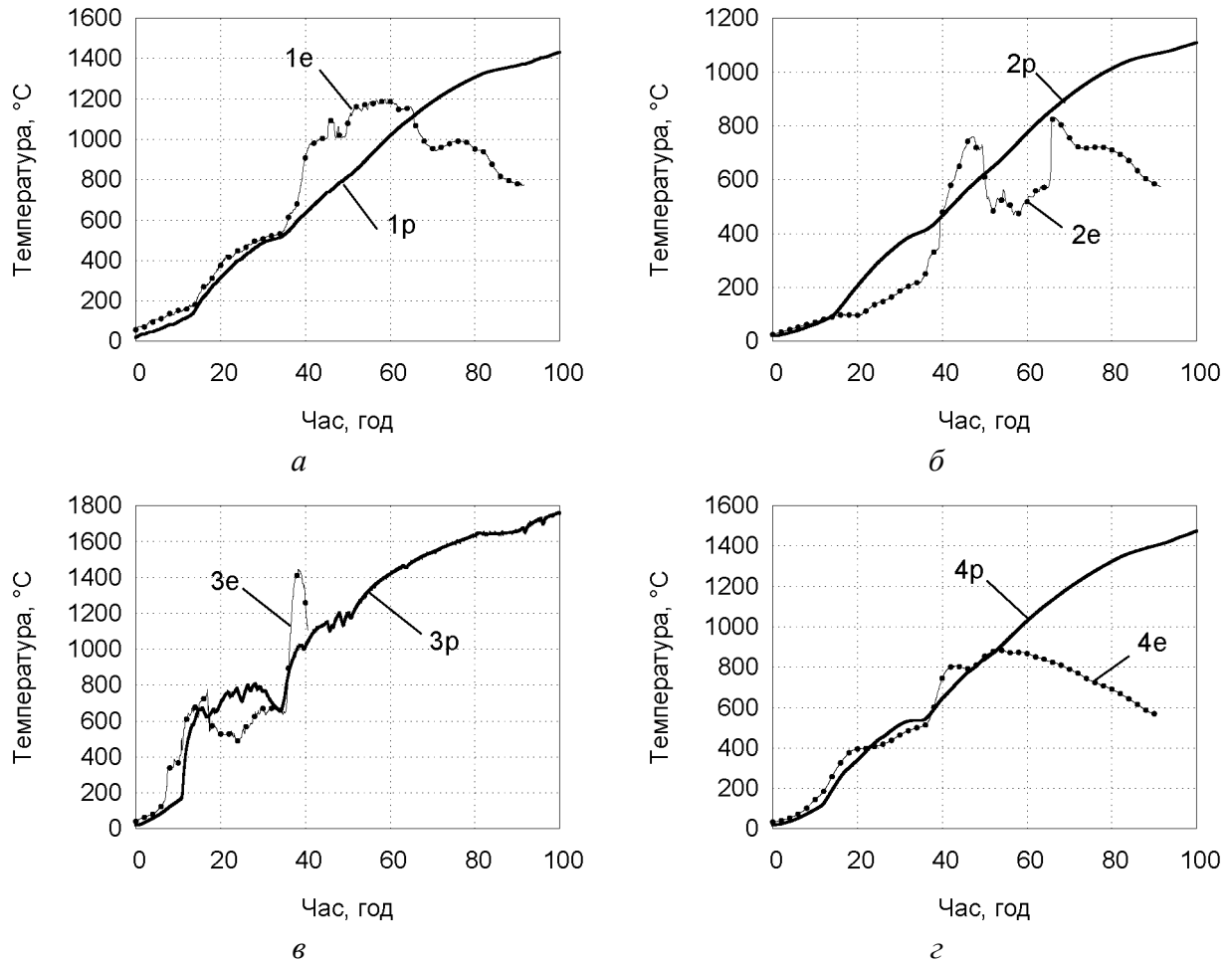


Рис. Д.1. Порівняння експериментально виміряних значень температури кампанії № 1 з даними числового аналізу, аркуш 1:

a–с – зіставлення температури отриманої при числовому аналізі та виміряної експериментально; 1–31 – точки вимірювання (див. рис. 4.7);

e, p – експериментальні та розрахункові дані, відповідно

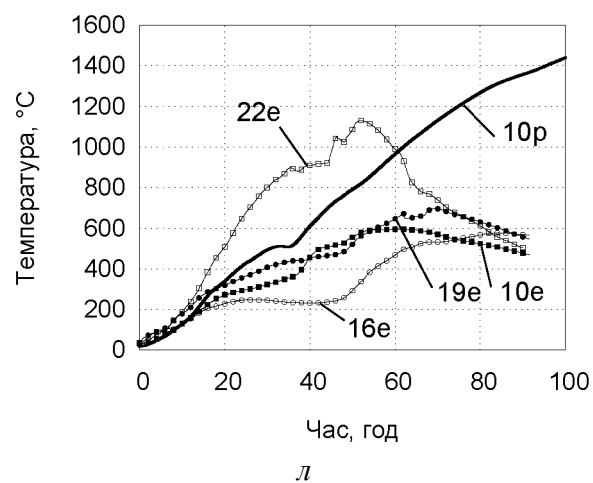
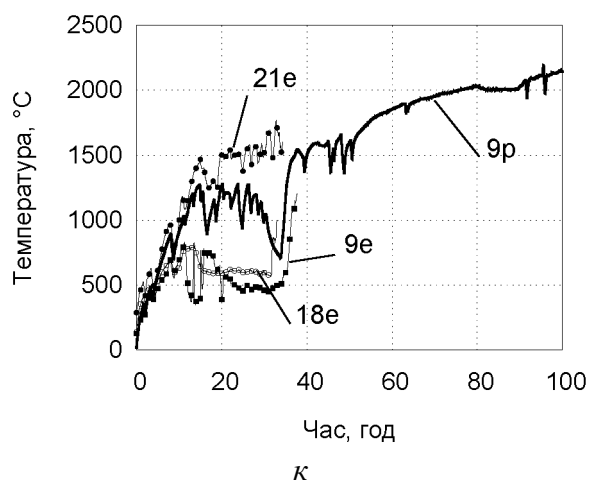
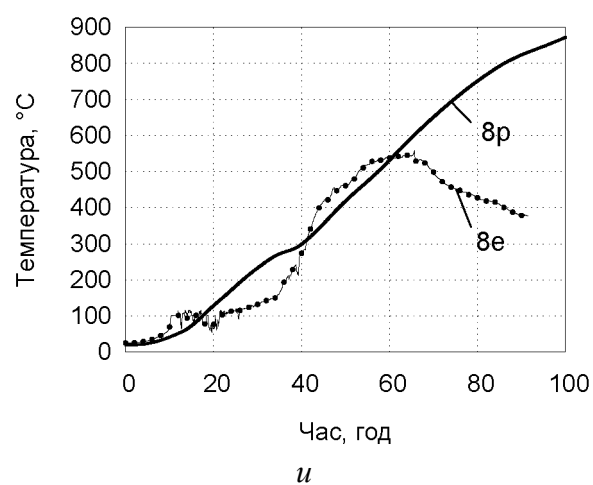
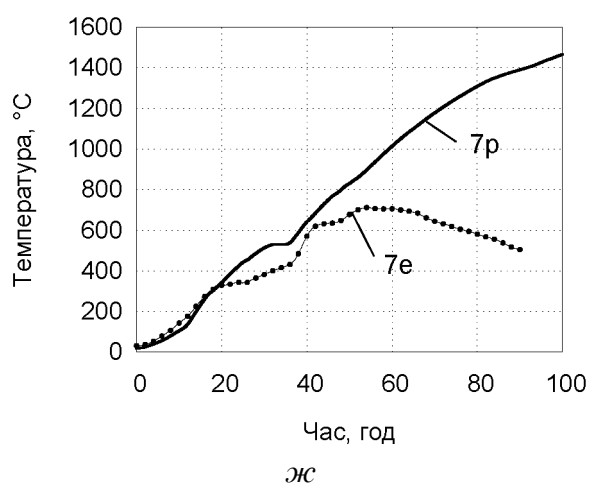
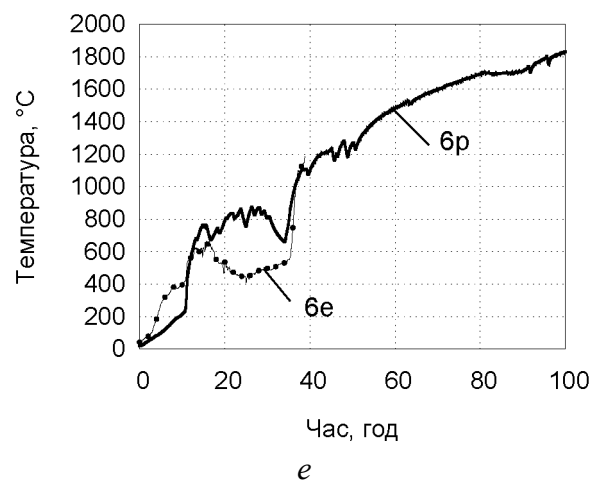
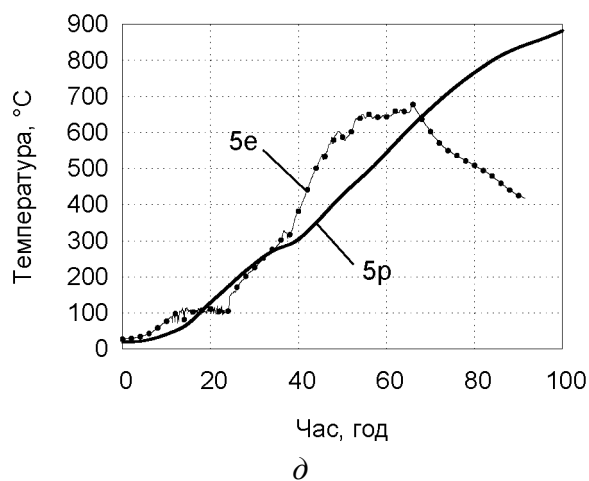


Рис. Д.1: аркуш 2

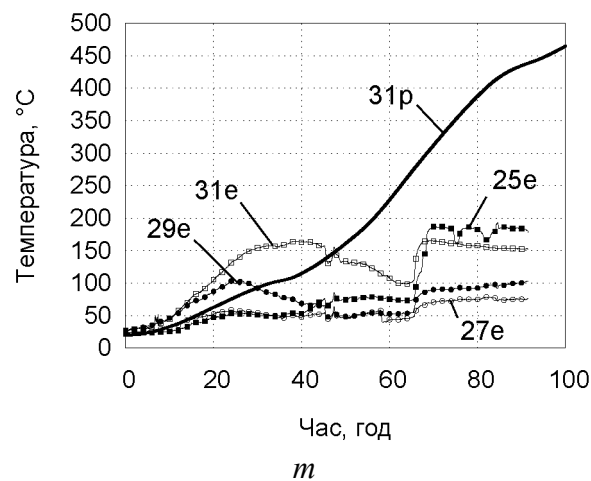
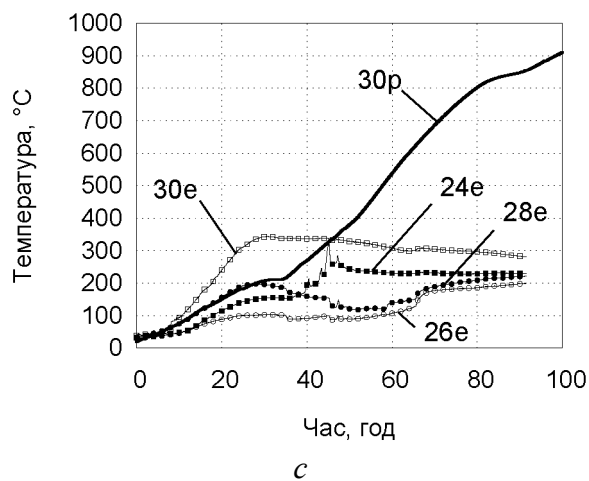
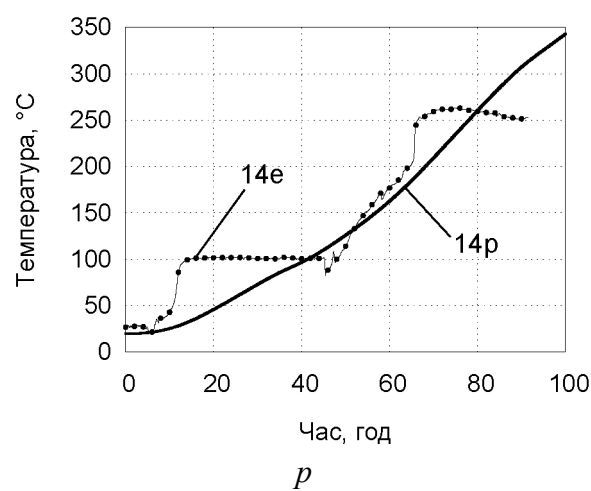
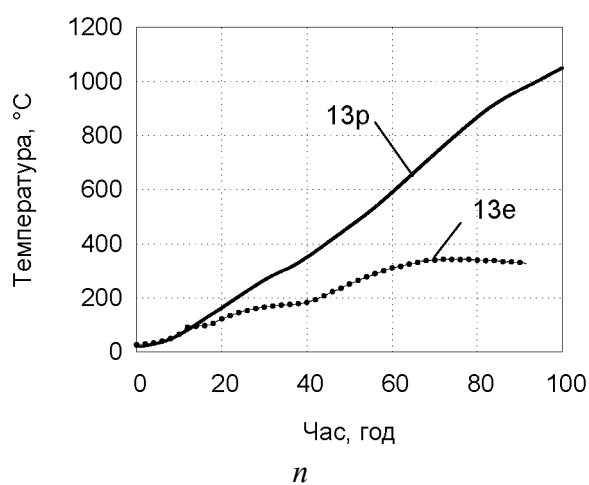
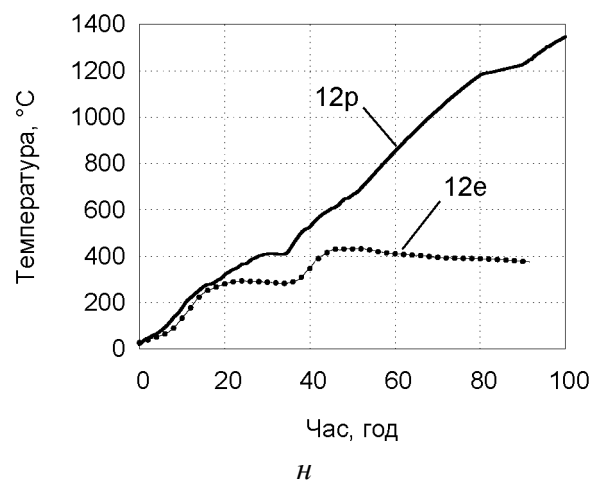
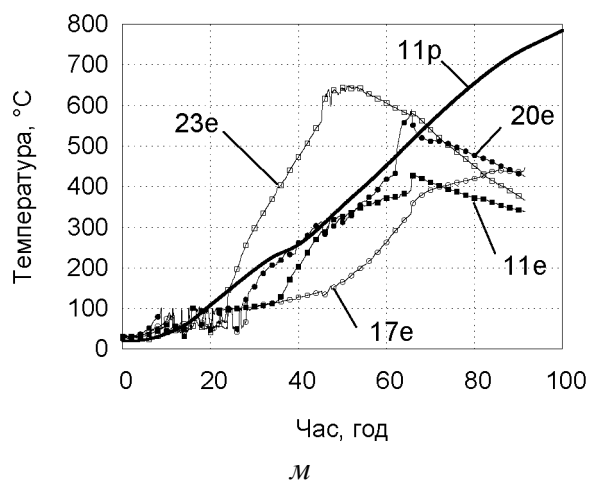


Рис. Д.1: аркуш 3

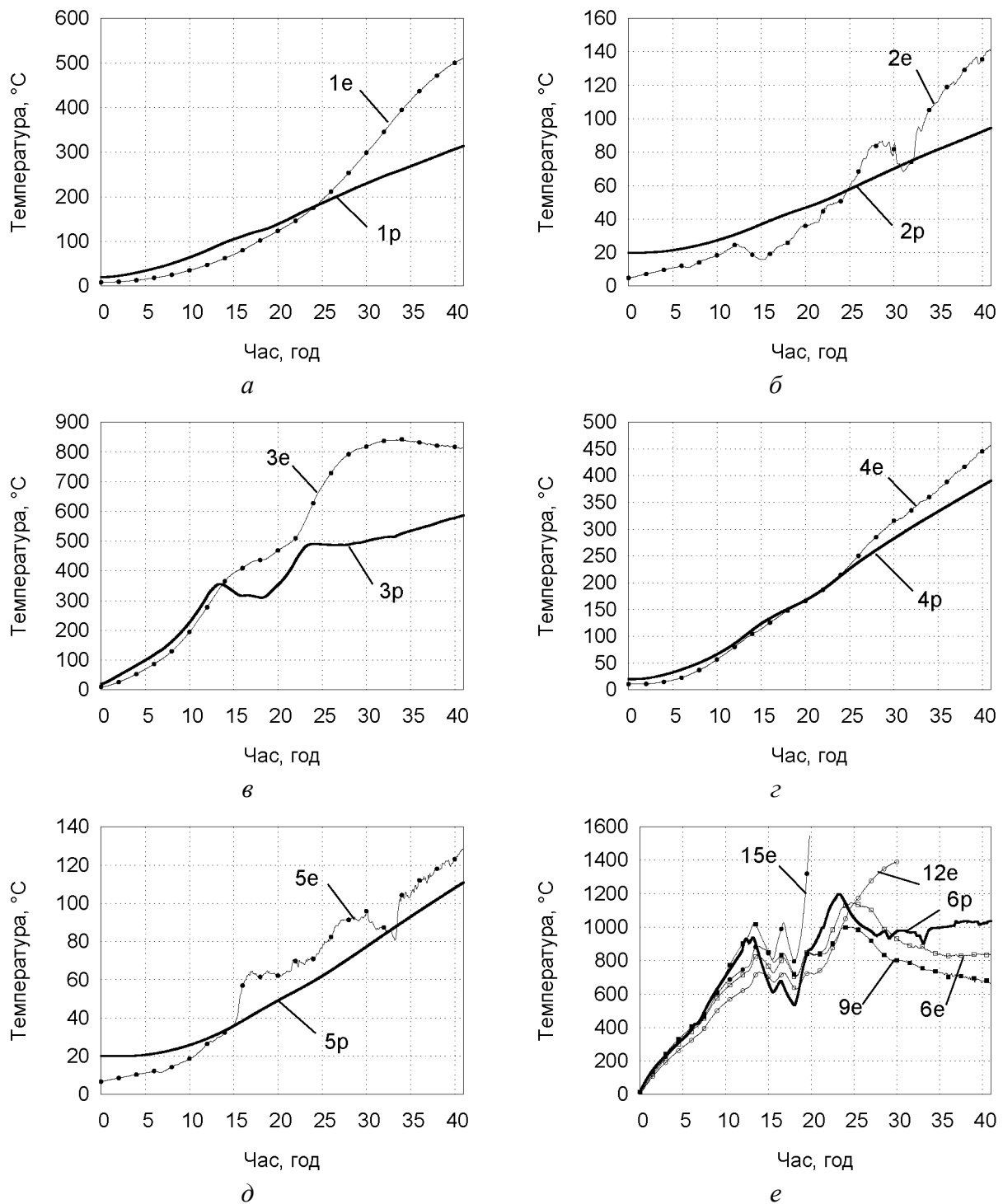


Рис. Д.2. Порівняння експериментально виміряних значень температури кампанії № 2 з даними числового аналізу, аркуш 1:

a–o – співставлення температури отриманої при числовому аналізі та виміряної експериментально; *1–28* – точки вимірювання (див. рис. 4.8);
e, p – експериментальні та розрахункові дані, відповідно

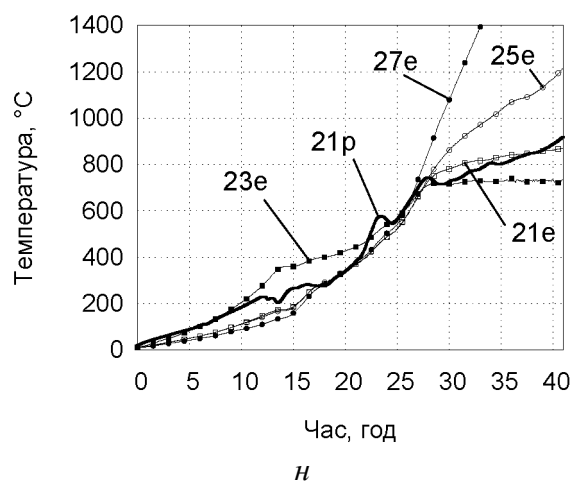
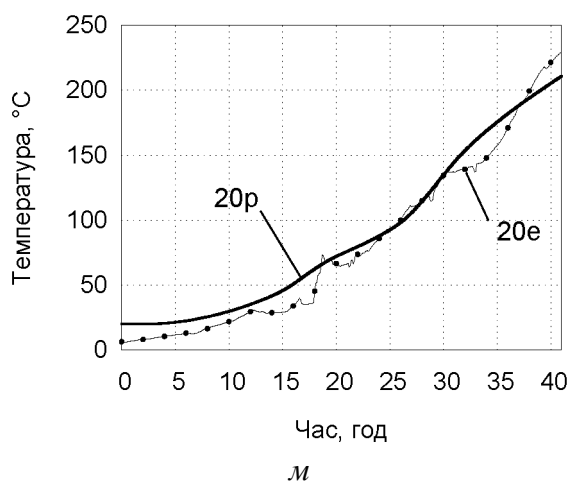
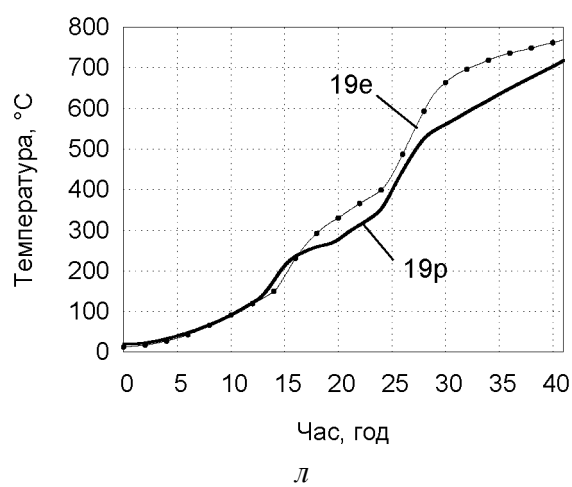
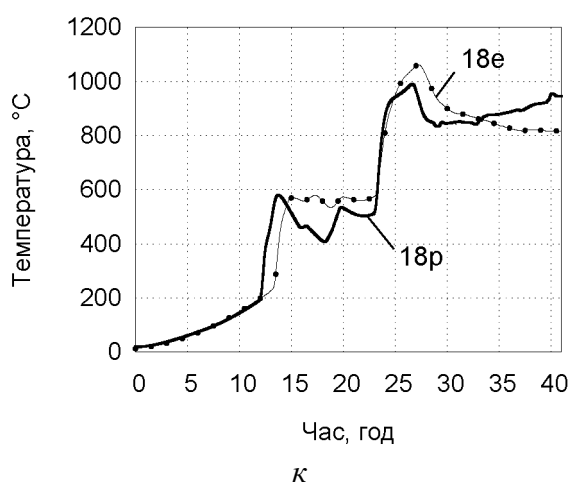
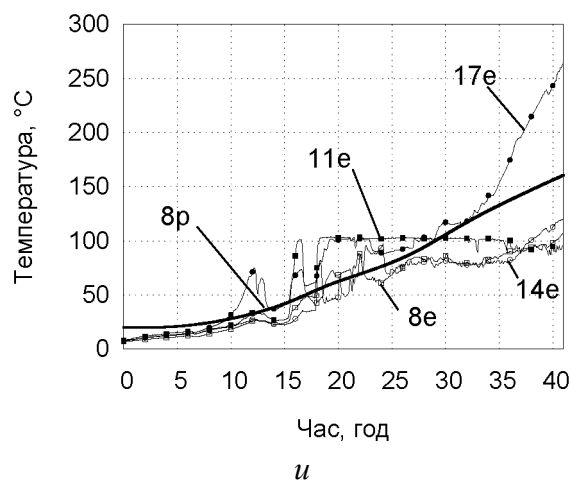
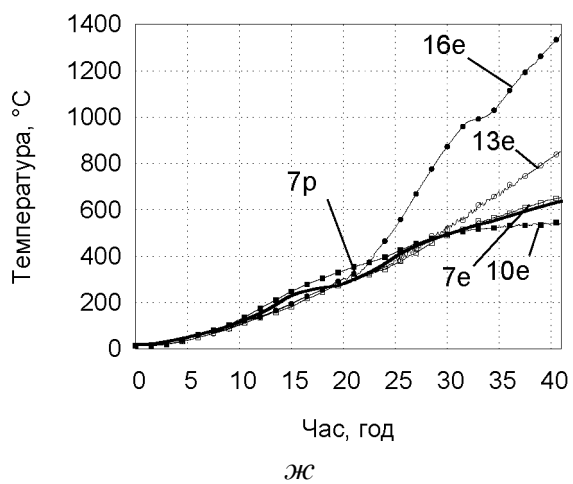


Рис. Д.2: аркуш 2

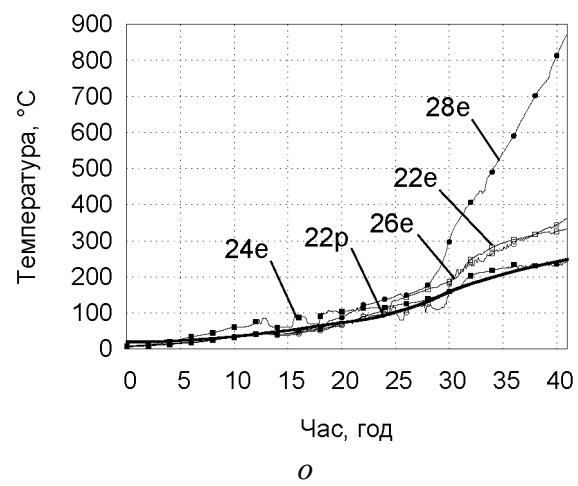


Рис. Д.2: аркуш 3

ДОДАТОК Е

Фізичні властивості матеріалів електрокальцинатора

Таблиця Е.1 – Теплофізичні властивості вогнетривкого шамоту марки ША

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{Дж/(кг}\cdot\text{K)}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$
273	1900	675	0,84
323	1900	797	–
373	1900	877	–
423	1900	933	–
473	1900	975	–
523	1900	1008	0,99
773	1900	1111	1,14
1023	1900	1176	1,29
1273	1900	1230	1,44
1523	1900	1279	1,59

Таблиця Е.2 – Хімічний склад і фізичні властивості мулітокорундового вогнетриву марки МКС85

$\text{Al}_2\text{O}_3, \%$	$\text{Fe}_2\text{O}_3, \%$	Поруватість відкрита, %	Густина, кг/м^3	Тепло-провідність, $\text{Вт/(м}^2\cdot\text{K)}$ при 100 °C	Температура розм'якшення, °C
≥ 85	$\leq 1,5$	≤ 23	2890–3120	2,1	≥ 1600

Таблиця Е.3 – Хімічний склад мулітокремнеземистого фетру МКРФ-100

$\text{Al}_2\text{O}_3, \%$	$\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2, \%$	$\text{Fe}_2\text{O}_3, \%$
50	≥ 47	$\leq 0,2$

Таблиця Е.4 – Фізичні властивості мулітокремнеземистого фетру МКРФ-100

Густина, кг/м^3	Межа міцності на розрив, Н/мм^2	Теплопровідність при 600 °C, $\text{Вт/(м}^2\cdot\text{K)}$	Максимальна робоча температура, °C
100	0,01	0,17	1150

Таблиця Е.5 – Хімічний склад мулітокремнеземистого фетру МКРФ-200

$\text{Al}_2\text{O}_3, \%$	$\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2, \%$	$\text{Cr}_2\text{O}_3, \%$
48	≥ 47	2–4

Таблиця Е.6 – Фізичні властивості мулітокремнеземистого фетру МКРФ-200

Густина, кг/м ³	Межа міцності на розрив, Н/мм ²	Теплопровідність при 600 °С, Вт/(м ² ·К)	Максимальна робоча температура, °С
200	0,01	0,13	1300

Таблиця Е.7 – Теплофізичні властивості графітованого електрода

T, К	ρ , кг/м ³	c_p , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	ПЕО, мкОм·м
0	1900	91,88	650	37,6
100		88,44	781	35,9
250		83,29	1166	33,2
500		69,42	1461	30,6
750		56,48	1613	29,6
1000		46,85	1721	30,1
1250		40,66	1816	31,6
1500		36,89	1897	34,1
1750		34,32	1979	37,3
2000		32,1	2054	41,1
2250		29,9	2131	45,2
2500		28,1	2206	49,4
2750		27,1	2282	53,1
3000		27,1	2357	55,6

Таблиця Е.8 – Хімічний склад та фізичні властивості високотемпературного цирконієвого вогнетриву

Al ₂ O ₃ , %	ZrO ₂ , %	SiO ₂ , %	Густина, кг/м ³	Теплопровідність, Вт/(м ² ·К) при 100 °С	Температура розм'якшення, °С
48	>50	>25	3480–3830	1,4	≥2000

Таблиця Е.9 – Теплофізичні властивості вугілля

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{Дж/(кг}\cdot\text{K)}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$	ПЕО, мкОм·м
0	1550	6,66	714	142
100		6,87	865	137
250		7,19	1226	131
500		7,74	1499	120
750		8,3	1648	111
1000		8,87	1759	102
1250		9,44	1866	94
1500		10,03	1930	87
1750		10,63	1986	80
2000		11,2	2101	75
2250		11,9	2157	71
2500		12,5	2206	68
2750		13,1	2282	67
3000		13,8	2357	67

Таблиця Е.10 – Теплофізичні властивості залізобетону

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{Дж/(кг}\cdot\text{K)}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$
273	2100	850	1,35
373		900	1,23
523		1030	1,1
773		1300	0,8
1023		1570	0,75
1273		1700	0,55
1573		1650	0,54

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бухаркина Т. В. Химия природных энергоносителей и углеродных материалов / Т. В. Бухаркина, Н. Г. Дигуров. — М. : РХТУ им. Д.И. Менделеева, 1999. — 195 с.
2. Химия гиперкоординированного углерода. Supercarbon chemistry / Дж. Ола, Г. К. С. Пракаш, Р. Е. Уильямс и др.; пер. с англ. В. И. Минкина. — М. : Мир, 1990. — 336 с.
3. Углерод — Википедия. [Электронный ресурс]. — Дата доступа : черв. 2012 р. — Режим доступа : <http://www.ru.wikipedia.org/wiki/Углерод>.
4. Искусственный графит / [В. С. Островский, Ю. С. Виргильев, В. И. Костиков и др.]. — М. : Metallurgy, 1986. — 272 с.
5. Фиалков А. С. Углерод, межслоевые соединения и композиты на его основе / А. С. Фиалков. — М. : Аспект Пресс, 1997. — 718 с.
6. Чалых Е. Ф. Оборудование электродных заводов : учеб. пособие [для вузов] / Е. Ф. Чалых. — М. : Metallurgy, 1990. — 238 с.
7. Dannenberg E. N. Primary structure and surface properties of carbon black / E. N. Dannenberg // Rubber Age, (Sept., 1966) : Abstr. — 1966. — P. 82—90.
8. Franklin R. E. The structure of graphitic carbons / R. E. Franklin. // Acta Crystallographica. — 1951. — Vol. 4. — P. 253—261.
9. Fischbach D. B. Chemistry and physics of Carbon / D. B. Fischbach. — Lond. : 1971, Vol. 7. — P. 1—105.
10. Шулепов С. В. Физика углеграфитовых материалов / С. В. Шулепов. — М. : Metallurgy, 1972. — 256 с.
11. Bacon G. E. The interlayer spacing of graphite / G. E. Bacon // Acta Crystallographica. — 1951. — Vol. 4 (6). — P. 558—561.
12. Чалых Е. Ф. Технология и оборудование электродных и электроугольных предприятий / Е. Ф. Чалых. — М. : Metallurgy, 1972. — 432 с.
13. Производство электродной продукции / А. К. Санников, А. Б. Сомов, В. В. Ключников [и др.]. — М. : Metallurgy, 1985. — 129 с.
14. Кузнецов Д. М. Процесс графитации углеродных материалов. Современные методы исследования : монография / Д. М. Кузнецов, В. П. Фокин. — Новочеркасск : ЮРГТУ, 2001. — 132 с.
15. Modern aspects of graphite technology / Ed. by L. C. F. Black — New York : Academic Press. — 1970. — 20 p.
16. Чалых Е. Ф. Производство электродов / Е. Ф. Чалых. — М. : Metallurgizdat, 1954. — 328 с.
17. Чалых Е. Ф. Технология углеграфитовых материалов / Е. Ф. Чалых. — М. : Metallurgizdat, 1963 — 304 с.
18. Чалых Е. Ф. Графитизация / Е. Ф. Чалых. — М. : Metallurgy, 1987. — 176 с.
19. Кашелев И. М. Использование каменных углей в качестве углеродистого наполнителя при изготовлении электродной массы / И. М. Кашелев, А. И. Солдатов, В. М. Страхов // Кокс и химия. — 2000. — № 1. — С. 20—23.
20. Шулепов С. В. Физика углеграфитовых материалов / С. В. Шулепов. — М. : Metallurgy, 1972. — 256 с.
21. Сюняев З. И. Производство, облагораживание и применение нефтяного кокса / З. И. Сюняев. — М. : Химия, 1973. — 296 с.

22. *Обжиг* и пуск алюминиевых электролизеров : монография / Б. С. Громов, Е. Н. Панов, М. Ф. Боженко [и др.]. — М. : Изд. дом «Руда и металлы», 2001. — 336 с.
23. *Чалых Е. Ф.* Обжиг электродов / Е. Ф. Чалых. — М. : Metallurgia, 1981. — 116 с.
24. *Marsh H.* Struktural changes of anthracite / H. Marsh // 14 th Bienn. Conf. on Carbon. — Penns. USA, 1979. — P. 165.
25. *Исследование* газопроницаемости слоя антрацита при производстве термоантрацита в электрокальцинаторе / М. И. Гасик, А. Г. Гриншпунт, Е. И. Цибуля [и др.] // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. — 2007. — № 3. — С. 30—33.
26. *Brandtzoed S. R.* Struktural changes during calcinations of coke and anthracite / S. R. randtzoed // Doct. Thesis, Univ. Trondheim, Norway. — 1985. — No 45. — P. 200—209.
27. *Теоретичні та експериментальні дослідження* теплоелектричного та механічного стану високотемпературних агрегатів : моногр. / А. Я. Карвацький, Є. М. Панов, С. В. Кутузов [та ін.] — К. : НТУУ «КПІ», 2012. — 352 с.
28. *Петров Б. Ф.* Энергосбережение в производстве электродного термоантрацита / Б. Ф. Петров: монография. — К.: «Екотехнологія», 2006. — 144 с.
29. *Power saving at production of electrode products* / Ye. N. Panov, S. V. Kutuzov, A. Ya. Karvatsky [et al.] // XVII International Conference «Aluminium of Siberia», V Conference «Metallurgy of Non-Ferrous and Rare Metals», VII Symposium «Gold of Siberia», (Krasnoyarsk, Russia, Sept. 7—9, 2011) : Proceedings of the Intern. Congress, Krasnoyarsk : «Verso», 2011. — P. 412—423.
30. *Physical processes modern investigation methods in power-intensive industrial equipments* / E. N. Panov, A. Ya. Karvatsky, I. L. Shilovich [et al.] // *Aluminium of Siberia — 2008* : XIV Intern. conf. exhib., (Krasnoyarsk, Sept. 10—12, 2008) : proceedings of the conference. — Krasnoyarsk : «Verso», 2008. — P. 124—132.
31. *Современное состояние проблемы* получения графитированного наполнителя электродных изделий в электрокальцинаторах / Е. Н. Панов, А. А. Матвиенко, А. Я. Карвацкий [и др.] // *Вісник НТУУ “КПІ”. Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*. — 2011. — № 1(7) додаток. — С. 49—55.
32. *Пирогов В. И.* Применение антрацита как наполнителя углеродной продукции / В. И. Пирогов, А. Н. Селезнев // *Российский Химический Журнал*. — 2006. — т. L, № 1 — С. 12—16.
33. *Гасик М. М.* Моделирование термического и электрического режимов работы электрокальцинатора при термической обработке антрацита / М. М. Гасик, М. И. Гасик, О. Ю. Уразлина // *Металлург. и горноруд. пром-сть*. — 2004. — № 5. — С. 18—23.
34. *Гасик М. М.* Моделирование теплотехнических процессов термообработки антрацита при воздушном и пленочном охлаждении кожуха электрокальцинатора / М. М. Гасик, М. И. Гасик, О. Ю. Уразлина // *Металлург. и горноруд. пром-сть*. — 2004. — № 6. — С. 31—35.
35. *Гасик М. М.* Компьютерное моделирование и опытно-промышленное освоение технологии одностадийной прокалики антрацита в электрокальцинаторе / М. М. Гасик, М. И. Гасик, Б. Ф. Петров // *Металлург. и горноруд. пром-сть*. — 2006. — № 3. — С. 27—30.
36. *Гасик М. М.* Математическое моделирование процесса прокаливания термоантрацит в электрокальцинаторе / М. М. Гасик, М. И. Гасик, Б. Ф. Петров // *Металлург. и горноруд. пром-сть*. — 2006. — № 10. — С. 32—36.
37. *Perron J.* Optimization of Anthracite Calcination Process in a Vertical Electric Arc Furnace / J. Perron, J. -F. Bouvette, M. Dupuis // *Light Metals*. — 1996. — P. 597—602.

38. *Hachette R. A.* CFD Dynamic Model of the Anthracite Calciner / R. Hachette, R. T. Bui, G. Simard, J. Perron, J. -F. Bouvette, M. Dupuis // *Light Metals*. — 1997. — P. 677—687.
39. *Моделювання графітування нафтового коксу в шахтній електропечі неперервної дії* / Є. Н. Панов, А. Я. Карвацький, С. В. Кутузов [и др.] // *Вісник НТУУ “КПІ”. Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження* : зб. наук. праць. — 2011. — № 1. — С. 48—51.
40. *Holdich R. G.* Fundamentals of Particle Technology / R. G. Holdich — Midland Information Technology and Publishing, 2002.— 173 p.
41. *K. Kesava Rao.* An Introduction to Granular Flow / K. Kesava Rao, Prabhu R. Nott. — New York : Publ. in the USA by Cambridge University Press, 2008. — 490 p.
42. *Клейн Г. К.* Строительная механика сыпучих тел / Г. К. Клейн — М.: Стройиздат, 1977. — 256 с.
43. *Granular materials: Shaken sand – a granular fluid?* / Umbanhowar P. // *Nature*. — 2003. — Vol. 424. — P. 886—887.
44. *Review on testers for measuring flow properties of bulk solids/ Jörg Schwedes* // *Granular Matter*. — 2003. — Vol. 5, Iss. 1.— P. 1—43.
45. *Schulze D.* Powders and Bulk Solids [8 ed.]/ D. Schulze. — Springer, 2008. — 516 p.
46. *Measuring the flowing properties of powders and grains* / G. Lumay, F. Boschini, K. Traina [et al.] // *Powder Technology*. — 2012. — Vol. 224. — P. 19–27.
47. *Ileleji K. E.* The angle of repose of bulk corn stover particles / Ileleji K. E., B. Zhou // *Powder Technology*. — 2008. — Vol. 187. — P. 110—118.
48. *Forterre Y.* Flows of dense granular media / Y. Forterre, O. Pouliquen // *Annu. Rev. Fluid Mech.* — 2008. — Vol. 40. — P. 1—24.
49. *Pouliquen O.* Dense flows of dry granular material / O. Pouliquen, F. Chevoir // *C. R. Physique*. — 2002. — Vol. 3. — P. 163—175.
50. *Kamrin K.* Nonlocal Constitutive Relation for Steady Granular Flow / K. Kamrin, G. Koval // *Physical Review Letters*.— 2012. — Vol. 108, Iss. 17. — P. 178301.
51. *On dense granular flows* / GDR MiDi // *Eur Phys J E Soft Matter*. — 2004. — Vol. 14. — P. 341—365.
52. *Dense granular flows in a vertical chute* / F. Chevoir, M. Prochnow, P. Moucheron [et al.] // *Powder and Grains*. — 2001. — P. 399—402.
53. *Pouliquen O.* Stress fluctuations and shear zones in quasi-static granular chute flows / O. Pouliquen, R. Gutfraind // *Phys. Rev. E*. — 1996. — Vol. 53, Iss. 1. — P. 552—561.
54. *Седов Л. И.* Механика сплошной среды : [изд. 6-е, стер.] / Л. И. Седов. — СПб. : изд-во «Лань», 2004. — 560 с. — (Т. 2).
55. *Syamlal M.* MFIx Documentation: Theory Guide / M. Syamlal, W. Rogers, T. J. O'Brien. [Електронний ресурс]. — Дата доступу : трав. 2010 р. — Режим доступу : <https://www.mfix.org/documentation/Theory.pdf>
56. *Syamlal M.* Computer Simulation of Bubbles in a Fluidized Bed / M. Syamlal, T. J. O'Brien // *AIChE Symp. Series*.— 1989. — Vol. 85. — P. 22—31.
57. *Gidaspow D.* Multiphase Flow and Fluidization / D. Gidaspow — Academic Press, 1994. — 467 p.
58. *ANSYS, Inc.* ANSYS FLUENT User's Guide Documentation. [Електронний ресурс]. — Дата доступу : трав. 2010 р. — Режим доступу : <https://www.ansys.com>

59. *Kinetic Theories for Granular Flow: Inelastic Particles in Couette Flow and Slightly Inelastic Particles in a General Flow Field* / C. K. K. Lun, S. B. Savage, D. J. Jeffrey [et al.] // *J. Fluid Mech.* — 1984. — Vol. 140. — P. 223—256.
60. *Моделирование процесса сфероидизации мелкодисперсных частиц кварца в ВЧИ-плазмотроне* / Е. Н. Панов, Н. А. Иванов, В. В. Кондратьев [и др.] // *Вісник НТУУ “КПІ”. Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження.* — 2011. — № 1(7) додаток. — С. 85—94.
61. *Pöschel T. Computational granular dynamics models and algorithms* / T. Pöschel, T. Schwager. — Springer, 2005. — 322 p.
62. *Herrmann H. J. Review Article: Modeling granular media with the computer* / H. J. Herrmann, S. Luding // *Continuum Mechanics and Thermodynamics.* — 1998. — Vol. 10. — P. 189—231.
63. *Hill J. M. Mathematics and mechanics of granular materials* / J. M. Hill, A. P. S. Selvadurai. — Springer, 2004. — 316 p.
64. *Göncü F. Mechanics of granular materials: constitutive behavior and pattern transformation* / F. Göncü — Ipskamp Drukkers, 2012. — 144 p.
65. *Luding S. Introduction to Discrete Element Methods: basics of contact force models and how to perform the micro–macro transition to continuum theory, [Електронний ресурс].* — Дата доступу : трав. 2010 р. — Режим доступу : http://www2.msm.ctw.utwente.nl/sluding/PAPERS/luding_alert2008.pdf
66. *Granular and Complex Materials. World Scientific Lecture Notes in Complex Systems: Vol. 8* / ed. T. Aste, T. Di Matteo, A. Tordesillas. — World Scientific Publishing Company, 2007. — 268 p.
67. *Прецизионные термокинетические исследования превращений в донецком антраците при прокалке его на воздухе и в аргоне в интервале температур 100–1400 °С.* / М. М. Гасик, О. Ю. Уразлина, С. В. Кутузов, М. И. Гасик // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* — 2006. — № 1. — С. 26—30.
68. *Исследование физических свойств термоантрацита при высокотемпературной прокалке антрацита* / О. Ю. Уразлина, М. М. Гасик, М. И. Гасик // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* — 2004. — № 4. — С. 17—20.
69. *Makse H. A. Granular packings: Nonlinear elasticity, sound propagation, and collective relaxation dynamics* / H. A. Makse, N. Gland, D. L. Johnson, L. Schwartz // *Phys. Rev. E.* — 2004, Vol. 70. — P. 061302.
70. *Rolling friction in the dynamic simulation of sandpile formation* / Y. C. Zhou, B. D. Wright, R. Y. Yang, B. H. Xu, A. B. Yu // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications.* — 1999, 269 (2-4). — P. 536-553.
71. *Assessment of rolling resistance models in discrete element simulations* / Ai. Jun, Chen Jian-Fei, J. M. Rotter, Y. O. Jin // *Powder Technology.* — 2011, 206(3). — P. 269—282.
72. *Discrete particle simulation of radial segregation in horizontally rotating drum: Effects of drum-length and non-rotating end-plates* / Ram Chand, Murad Ali Khaskheli, Abdul Qadir, Baoliang Ge, Qingfan Shi // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications.* — 2012, 391 (20). — P. 4590—4596.
73. *A comparison of discrete element simulations and experiments for ‘sandpiles’ composed of spherical particles* / YanjieLi, YongXu, C. Thornton // *Powder Technology.* — 2005. — Vol. 160, Iss. 3. — P. 219—228.
74. *Joel H., Peric M. Computational Methods for Fluid Dynamics. 3rd ed.* / H. Joel, M. Peric. — Springer, 2002. — 426 p.

75. *Математичне моделювання складного теплообміну повітряних регенераторів: монографія* / Є. М. Панов, А. Я. Карвацький, І. Л. Шилович [та ін.]. — К. : НТУУ «КПІ», 2011. — 103 с.
76. *Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости* / С. Патанкар ; пер. с англ. В. Д. Виленского. — М. : Энергоатомиздат, 1984. — 153 с.
77. *OpenFOAM – Open Field Operation and Manipulation*. www.openfoam.org.
78. *LIGGGHTS Open Source Discrete Element Method Particle Simulation Code*. www.liggghts.com
79. *LAMMPS – Large-scale Atomic Molecular Massively Parallel Simulator*. www.lammps.sandia.gov
80. *Лутков А. И. Тепловые и электрические свойства углеродных материалов* / А. И. Лутков. — М. : Metallurgia, 1990. — 175 с.
81. *Краснощеков Е. А. Задачник по теплопередаче : учебн. пособие* / Е. А. Краснощеков, А. С. Сукомел. — М. : Энергия, 1969. — 264 с.
82. *Физические величины: Справочник* / А. П. Бабищев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский [и др.] ; под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. — М. : Энергоатомиздат, 1991. — 1232 с.
83. *Physical processes modern investigation methods in power-intensive industrial equipments* / E. N. Panov, A. Ya. Karvatsky, I. L. Shilovich, [et al] // *Aluminium of Siberia – 2008 : XIV Intern. conf. exhib., (Krasnoyarsk, Sept. 10—12, 2008) : proc. of the conf.* — Krasnoyarsk : «Verso», 2008. — P. 124—132.
84. *Lienhard J. H. A heat transfer textbook. 3ed. ed.* / J. H. Lienhard, J. H. Lienhard // Cambridge, MA: Phlogiston Press. — 2008.— 762 p.
85. *Levenberg K. A Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares* / K. Levenberg // *Quarterly of Applied Mathematics*. — 1944. — № 2 — P. 164—168.
86. *Theory for shear-induced segregation of dense granular mixtures* / Yi Fan, K. M. Hill // *New J. Phys.*— 2011, Vol. 13. — P. 095009
87. *Гасик М. И. Исследование влияния термической обработки на структуру и некоторые свойства термоантрацита для углеродных масс самообжигающихся электродов* / М. И. Гасик, А. Г. Гриншпунт // *Химия твердого топлива*. — 1981. — № 4. — С.15—18.
88. *Cornejo P. Mathematical Modeling of Coal Gasification in Fluidized Bed Reactor Using an Eulerian Granular Description* / P. Cornejo, O. Farias // *International Journal of Chemical Reactor Engineering*. — 2011, Vol. 9, Issue 1. — P. 1515—1542.
89. *Wen C. -Y. Mechanics of Fluidization* / C. -Y. Wen, Y. H. Yu // *Chem. Eng. Prog. Symp. Series*. — 1966. — Vol. 62. — P. 100—111.
90. *Syamlal M. Computer Simulation of Bubbles in a Fluidized Bed* / M. Syamlal, T. J. O'Brien // *AIChE Symp. Series*. — 1989. — Vol. 85. — P. 22—31.
91. *Mathematical Model of Solid-Fuel Gasification in a Fluidized Bed* / E. N. Panov, A. Ya. Karvatskii, T. B. Shilovich, T. B. Lazarev, A. S. Moroz // *Chemical and Petroleum Engineering*. — 2014. — Vol. 50, Nos. 5–6. — P. 312—322.
92. *Теплообмен в многокамерных печах обжига углеграфитовых изделий: моногр.* / И. В. Пулинец, Е. Н. Панов, А. Я. Карвацький [и др.]. — К. : НТУУ «КПІ», 2014. — 176 с.
93. *Розроблення технології отримання графітованого коксу в шахтних електропечах безперервної дії: звіт про НДР (заключ.) : 2442п / Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т» ; кер. А. Я. Карвацький ; викон. Т. В. Лазарєв [та ін.]. — К., 2012. — 132 с. — № ДР 0111U000318.*
94. *Розробка заходів з ресурсо- та енергозбереження в електродному*

виробництві: звіт про НДР (заключ.) : 2641п / Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т» ; кер. Є. М. Панов ; викон. Т. В. Лазарев [та ін.]. — К., 2014. — 280 с. — № ДР 0113U002302.

95. *Розробка рецептури вогнетривких футерувань та теплоізоляції печей електродного виробництва: звіт про НДР (заключ.)* : 2642п / Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т» ; А. Я. Карвацький ; викон. Т. В. Лазарев [та ін.]. — К., 2014. — 184 с. — № ДР 0113U002303.

96. *Карвацкий А. Я.* Оценка метода дискретного элемента для прогнозирования поведения сыпучих сред на примере нефтяного кокса / А. Я. Карвацкий, Т. В. Лазарев // Химическое и нефтегазовое машиностроение. — 2014. — № 3. — С. 32—36.

97. *Карвацкий А. Я.* Применение метода дискретного элемента для задач динамики сыпучего материала в электрокальцинаторе / А. Я. Карвацкий, Т. В. Лазарев // VII Межд. конф. «Материалы и покрытия в экстремальных условиях» МЕЕ'2010, (24–28 сент. 2012 г., АР Крым, п. Кацивели) : Тез. докл. — К. : ИПМ НАН України, 2010. — С. 85.

98. *Дослідження властивостей сипучого вуглецевого матеріалу, що проходить термообробку в шахтних електричних печах* / Е.Н. Панов, А.Я. Карвацький, Г.Н. Васильченко [и др.] // «Інноваційний потенціал української науки – ХХІ сторіччя», (Запоріжжя, Лют. 26 – Бер. 6, 2013) : Зб. стат., Т.2, Природничі науки. — Запоріжжя, 2013. — С. 75—76.

99. *Karvatskii A. Ya.* Evaluation of the Discrete Element Method for Predicting the Behavior of Granular Media Using Petroleum Coke as an Example / A. Ya. Karvatskii, T. V. Lazarev // Chemical and Petroleum Engineering. — 2014. — Vol. 50, Nos. 3—4. — P. 186—192.

100. *Панов Е. Н.* Тестирование свободного CFD кода OPENFOAM на примерах задач электрического нагрева твердых тел / Е. Н. Панов, А. Я. Карвацкий, Т. В. Лазарев // X международная научно-практическая конференция-выставка «Экологические проблемы промышленных мегаполисов». (Донецк–Авдеевка, 3-5 июня 2013 г.) : Сб. докл. — Донецк : Донецкий национальный технический университет, 2013. — С. 138—143.

101. *Лазарев Т. В.* Моделювання теплоелектричного стану за допомогою OpenFoam / Т. В. Лазарев // Вісник НТУУ «КПІ». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження : зб. наук. праць. — 2013. — № 1(11). — С. 26—30.

102. *Пирогов В. И.* Свойства термоантрацита АПГ в зависимости от крупности его частиц: материал технической информации / В. И. Пирогов, А. Н. Селезнев, Л. Н. Ружевская // Цветные металлы. — 2004. — № 11. — С. 70—72.

103. *Пирогов В. И.* Получение углеродного материала высокотемпературной обработки в печах графитации Новосибирского электродного завода / В. И. Пирогов, А. Н. Селезнев // Цветные металлы. — 2004. — № 10. — С. 52—54.

104. *Пирогов В. И.* Применение антрацита как наполнителя углеродной продукции / В. И. Пирогов, А. Н. Селезнев // Российский Химический Журнал. — 2006. — т. L, № 1. — С. 12—16.

105. *Панов Є. М.* Установка для дослідження питомого електричного опору вуглецевих матеріалів / Є. М. Панов, Т. В. Чирка, Г. М. Васильченко // Вісник НТУУ «КПІ». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. — 2011. — № 1. — С. 18—20.

106. *Установка для измерения теплопроводности углеродных зернистых и порошковых материалов* / Е. Н. Панов, Г. Н. Васильченко, В. М. Голчанская, Т. В. Чирка // Вісник НТУУ «КПІ». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. — 2011.—

№ 1 (додаток). — С. 58—63.

107. *Установка для исследования теплопроводности сыпучих материалов до 1000 °С* / В. О. Зубченко, Ю. В. Дудник, Т. В. Чирка, Г. Н. Васильченко // Научно-практ. конф. студ., асп. та наук. каф. ХПСМ НТУУ «КПІ» : Ресурсоенергозберігаючі технології і обладнання хімічних виробництв та підприємств будівельних матеріалів, 27–29 квітня 2011 р., : зб. доп. — К. : Січкар, 2011. — С. 81—82.

108. *Автоматизация установки для исследования теплопроводности сыпучих материалов* / Ю. В. Дудник, Т. В. Чирка, Г. Н. Васильченко, С. В. Лелека, М. В. Коржик // Научно-практ. конф. студ., асп. та наук. каф. ХПСМ НТУУ «КПІ» : Ресурсоенергозберігаючі технології і обладнання хімічних виробництв та підприємств будівельних матеріалів, 27–29 квітня 2011 р., : зб. доп. — К. : Січкар, 2011. — С. 83—84.

109. *Eidem P. Determination of Electrical Resistivity of Dry Coke Beds* / P. Eidem, M. Tangstad, J. Bakken // Metallurgical and Materials Transactions B.— 2008.— № 39. — P. 7—15.

110. *Панов Е. Н. Комплекс сбора данных для высокотемпературных промышленных агрегатов* / Е. Н. Панов, С. В. Лелека, М. В. Коржик // ПиКАД. — 2005. — № 2. — С. 28—30.

111. *Агроскин А. А. Теплофизика твердого топлива* / А. А. Агроскин, В. Б. Глейбман. — М. : Недра, 1980. — 256 с.

112. *Оценка теплопроводности по величине удельного электрического сопротивления для сыпучих углеродных материалов* // Е. Н. Панов, Г. Н. Васильченко, Т. В. Чирка, Т. В. Лазарев / *Металлургия и горнорудная промышленность*.—2013. — № 5.— С. 6—9.

113. *Залежність питомої електропровідності вугільної шихти від температури, ступеню графітизації та гранулометричного складу*// Г. М. Васильченко, Т. В. Чирка, Т. В. Лазарев, А. О. Маловацький / *Вісник НТУУ “КПІ”. Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*. — 2014. — № 1(12). — С. 11—14.

114. *Making the Heat-Insulating Charge of Acheson Graphitization Furnaces More Efficient* // S. V. Kutuzov, V. V. Buryak, V. V. Derkach, E. N. Panov, A. Ya. Karvatskii, G. N. Vasil'chenko, S. V. Leleka, T. V. Chirka, T. V. Lazarev / *Refractories and Industrial Ceramics*.— 2014. —Vol. 55, Iss. 1.—P. 15—16

115. *Математическое моделирование физических полей при графитации нефтяного кокса*. / Є. Н. Панов, А. Я. Карвацький, И. Л. Шилович [и др.] // Всеукр. научно-практ. конф. студ., асп. та наук. : Ресурсоенергоефективні технології і обладнання хімічних виробництв та підприємств будівельних матеріалів, 27–29 квітня 2011 р. : зб. доп. — К. : Січкар, 2012. — С. 6—10.

116. *Дослідження теплоелектричного стану шахтної електропечі при графітуванні нафтового коксу* / А. Я. Карвацький, С. В. Лелека, Т. В. Лазарев, П. В. Степура // Всеукр. научно-практ. конф. студ., асп. та наук. : Ресурсоенергоефективні процеси, технології та обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів, 18–20 квітня 2012 р. : зб. доп. — К. : Січкар, 2012. — С. 17—21.

117. *Дослідження фізичних властивостей сипучого вуглецевого матеріалу, що проходить термообробку в шахтних електричних печах* / Є. М. Панов, А. Я. Карвацький, Г. М. Васильченко [и др.] // Перспективні напрямки української науки: ХІХ всеукраїнська науково-практична конференція «Інноваційний потенціал української науки – ХХІ сторіччя», (м. Запоріжжя, 26 лютого – 6 березня 2013 р.) : Зб. статей. Том 2. Природничі та точні науки. — С. 75—76.

118. Влияние свойств сыпучих материалов на энергоёмкость получения электродной продукции / С. В. Кутузов, В. В. Буряк, В. В. Деркач [и др.] // IV Межд. конгресс : «Цветные металлы», (Красноярск, Россия, Сент. 5—7, 2012) : Сб. докл. : «Версо», 2012. — С. 921—928.
119. *Теплоэлектрическое* состояние печей графитирования Ачесона: моногр. / С. В. Лелека, Е. Н. Панов, А. Я. Карвацкий [и др.]. — К.: НТУУ «КПИ», 2014. — 238 с.
120. Пат. 93166 U Україна, кл. МПК G01R 27/02 (2006.01). Установка для вимірювання питомого електричного опору вуглецевих матеріалів при високих температурах / Г. М. Васильченко, Т. В. Чирка, Т. В. Лазарев, А. О. Миловацький; заявник і патентовласник НТУУ «КПІ». — № u 2014 02290; заявл. 06.03.2014; опубл. 25.09.2014, Бюл. № 18. — 3 с.
121. *Бабарыкин Н.Н.* Свойства шихтовых материалов и их распределение на колошнике / Н.Н. Бабарыкин. — Магнитогорск : МГМИ, 1994. — 124 с.
122. *Исаченко В. П.* Теплопередача : учеб. пособие [для вузов] / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. — М. : Энергия, 1975. — 488 с.
123. *Je-Chin Han.* Analytical Heat Transfer / Je-Chin Han. — CRC Press, 2012. — 326 p.
124. *Преображенский В. П.* Теплотехнические измерения и приборы : учебн. [для вузов] / Виктор Павлович Преображенский. — М. : Энергия, 1978. — 704 с.
125. *Зайдель А. Н.* Элементарные оценки ошибок измерений / А. Н. Зайдель — Л. : Наука, 1968. — 95 с.
126. *Шенк Х.* Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк ; пер с англ. — М. : Мир, 1972. — 384 с.
127. *Рабинович С. Г.* Погрешность измерений / С. Г. Рабинович — Л. : Энергия, 1978. — 262 с.
128. *Сергеев О. А.* Метрологические основы теплофизических измерений / О. А. Сергеев — М. : Изд-во стандартов, 1972. — 154 с.
129. *Новицкий П. В.* Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф : [2-е изд., перераб. и доп.]. — Л. : Изд-во Энергоатомиздат, 1991. — 304 с.
130. Пат. на корисну модель 98757 України, кл. МПК (2015.01) G01N 13/00, G01B 11/26 (2006.01). Спосіб визначення кута природного укусу сипучих матеріалів / Т.В. Лазарев, А.Я. Карвацький, І.О. Мікульонок, А.Ю. Педченко; заявник і патентовласник НТУУ «КПІ». — № u 2014 11335; заявл. 17.10.2014; опубл. 12.05.2015, Бюл. № 9. — 3 с.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
1. СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОБРОБЛЕННЯ СИПУЧИХ ВУГЛЕЦЕВИХ МАТЕРІАЛІВ	10
1.1. Фізичні властивості штучного графіту та технологія його виробництва	10
1.1.1. Фізичні властивості, структура графіту та механізми процесу графітування вуглецю	10
1.1.2. Технологія отримання штучного графіту	14
1.1.3. Сучасний стан проблеми термообробки наповнювача електродних виробів	15
1.2. Математичне моделювання теплоелектричного стану шахтної електропечі	21
1.3. Моделювання статистики та динаміки сипучих матеріалів	23
1.4. Висновки та завдання досліджень	32
2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОБРОБЛЕННЯ РУХОМОГО ШАРУ СИПУЧОГО МАТЕРІАЛУ В ЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕЧАХ	35
2.1. Постановка задачі	35
2.2. Методика числового розв'язання	46
2.3. Методика числового розв'язання нелінійної теплоелектричної задачі за заданої електричної потужності системи	51
2.4. Програмне забезпечення	52
2.5. Розробка числових моделей фізичних полів високотемпературного оброблення рухомого шару сипучих матеріалів у електрокальцинаторі	54
3. АПРОБАЦІЯ І ВЕРИФІКАЦІЯ ЧИСЛОВОЇ МОДЕЛІ СТАТИКИ ТА ДИНАМІКИ СИПУЧИХ МАТЕРІАЛІВ НА ДАНИХ ТОЧНИХ РОЗВ'ЯЗКІВ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ	57
3.1. Верифікація математичної моделі статистики та динаміки сипучих матеріалів	57
3.1.1. Формування кута природного укусу методами натурного та числових експериментів	57
3.1.2. Щільний рух сипучого матеріалу у складному циліндричному каналі	64
3.2. Апробація OpenFOAM для задач теплового та теплоелектричного стану твердих тіл	69
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ТЕРМІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ СИПУЧИХ ВУГЛЕЦЕВИХ МАТЕРІАЛІВ В ЕЛЕКТРОКАЛЬЦИНАТОРІ	71
4.1. Експериментальні дослідження теплофізичних властивостей сипучих вуглецевих матеріалів, які оброблюються в електрокальцинаторі	72
4.2. Експериментальні кампанії високотемпературного оброблення антрациту й нафтового коксу та схеми вимірювань	80
4.3. Методика експериментальних досліджень	82

4.4. Результати експериментальних досліджень та їх аналіз	84
4.5. Апробація та верифікація числової моделі на даних натурних експериментів	92
5. ЗАКОНОМІРНОСТІ ПРОЦЕСУ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОБРОБЛЕННЯ РУХОМОГО ШАРУ СИПУЧОГО ВУГЛЕЦЕВОГО МАТЕРІАЛУ В ЕЛЕКТРОКАЛЬЦИНАТОРІ	99
5.1. Вплив дизайну дросель-шайби на технологічні показники роботи електрокальцинатора.....	99
5.2. Вплив геометричних параметрів дросель-шайби, активної електричної потужності та продуктивності на технологічні показники роботи електрокальцинатора	104
5.3. Модернізація регламенту пуску та експлуатації електрокальцинатора з дросель- шайбою для прожарювання антрациту	109
5.4. Модернізація конструкції електрокальцинатора для проведення процесу безперервного графітування нафтового коксу	112
ВИСНОВКИ.....	115
Додаток А. Результати розрахунків динаміки сипучого матеріалу за спрощеною моделлю електрокальцинатора	118
Додаток Б.Результати апробації OpenFOAM для задач теплового та теплоелектричного стану твердих тіл	119
Додаток В.Результати експериментальних досліджень на промисловому обладнанні	126
Додаток Г.Оцінка похибки експериментальних досліджень	130
Додаток Г.1. Теоретичні основи оцінки похибки експериментальних вимірювань.....	130
Додаток Г.2. Оцінка похибки дослідження температур за допомогою термопар.....	132
Додаток Д. Верифікація числових моделей.....	135
Додаток Е. Фізичні властивості матеріалів електрокальцинатора	141

Наукове видання

Лазарєв Тарас Валерійович
Карвацький Антон Янович
Панов Євген Миколайович
Лелека Сергій Володимирович
Педченко Анатолій Юрійович

**Закономірності процесу високотемпературного
оброблення сипучих вуглецевих матеріалів
в електричних печах**

Монографія

В авторській редакції